



## 저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

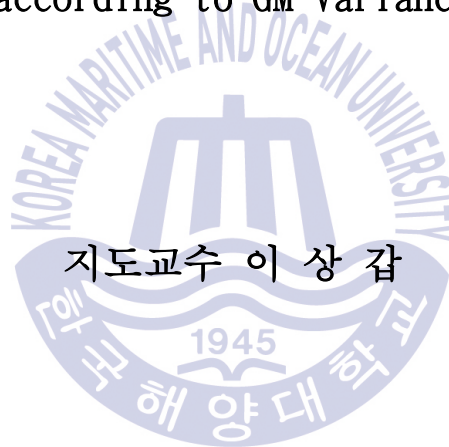
이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

# GM 변화에 따른 선박의 선회성능에 대한 연구

A Study on Turning Ability of Ship  
according to GM Variance



지도교수 이 상 갑

2018 년 2 월

한국해양대학교 대학원

조선해양시스템공학과

김 대 래

본 논문을 김대래의 공학석사 학위논문으로 인준함.



위원장

현 범 수

(인)

위 원

이 성 욱

(인)

위 원

이 상 갑

(인)

2018 년 02 월

한국해양대학교 대학원

# 목 차

목 차 .....	i
List of Tables .....	iii
List of Figures .....	iv
초 록 .....	viii
Abstract .....	x
1. 서 론 .....	1
2. 사고선박의 AIS 항적자료에 대한 고찰 .....	7
3. 횡경사 큰 모형선의 일반 항주시험 .....	13
4. 원격조정 모형선의 급선회 선회실험 .....	19
4.1 세월호 모형선 제작 .....	19
4.2 모형선의 중량 조정, 추진, 원격조종 및 측량 장치 .....	25
4.3 Froude 수에 의한 모형선의 선속 결정 .....	27
4.4 모형선의 선회시험 장소 및 GM 추정 .....	27
4.5 모형선의 선회시험 .....	30
4.5.1 실선 GM 90cm인 경우 .....	30
4.5.2 실선 GM 60cm인 경우 .....	32
4.5.3 실선 GM 30cm인 경우 .....	33
4.5.4 실선 GM 20cm인 경우 .....	37
4.6 선회시험 결과에 대한 고찰 .....	44

5. 결 론 .....	48
Reference .....	50
감사의 글 .....	52



## List of Tables

<b>Table 1</b>	AIS data of rapid turning casualty of ro-ro ferry Sewol .....	8
<b>Table 2</b>	Result of turning test at GM 90cm .....	32
<b>Table 3</b>	Result of turning test at GM 60cm .....	33
<b>Table 4</b>	Result of turning test at GM 30cm .....	34
<b>Table 5</b>	Result of turning test at GM 20cm .....	40
<b>Table 6</b>	Comparison of results of turning test at GM 20cm at ruder angle of 35° and 15° .....	43



## List of Figures

Fig. 1 Definitions of turning test(IMO, 2002b) .....	2
Fig. 2 Plotting of AIS track .....	9
Fig. 3 AIS tracks between original and correction of HDG .....	10
Fig. 4 Sea trial turning test report(twin propeller propulsion) .....	11
Fig. 5 Comparison of tactical diameters between rapid turning accident and sea trial turning test .....	12
Fig. 6 Running test of simple model ship with upright state .....	13
Fig. 7 Simple model ship with heeling angle $22^{\circ}$ to port .....	14
Fig. 8 Running test of simple model ship with heeling angle $22^{\circ}$ to port .....	14
Fig. 9 Running test of simple model ship listed to starboard .....	15
Fig. 10 Submerged configuration of container ship listed to starboard .....	16
Fig. 11 Submerged contour of container ship listed to starboard .....	16
Fig. 12 Flow velocity and pressure distribution along submerged surface of container ship listed to starboard .....	17
Fig. 13 Lines of ro-ro ferry Sewol .....	20
Fig. 14 Offset of ro-ro ferry Sewol .....	20
Fig. 15 Lines of ro-ro ferry Sewol on Auto Cad .....	21
Fig. 16 Lines output of ro-ro ferry Sewol on Auto Cad .....	21
Fig. 17 Parts of 3D hull modeling .....	22
Fig. 18 Assembly of 3D hull modeling .....	22
Fig. 19 Two parts of model ship using 3D printer .....	23
Fig. 20 General view of model ship .....	24
Fig. 21 Measurement of displacement weight of model ship .....	25
Fig. 22 General view of model ship and remote controller .....	25

Fig. 23	Measuring devices at model ship' s bow .....	26
Fig. 24	Action camcorder at model ship' s midship .....	26
Fig. 25	View of list test weight and vertical weight adjuster .....	28
Fig. 26	Principle of heeling test .....	29
Fig. 27	Hydrostatic characteristics of Sewol at departing deadweight state .....	29
Fig. 28	Turning test of model ship at GM 90cm at maximum heeling angle .....	31
Fig. 29	Turning test of model ship at GM 90cm .....	31
Fig. 30	Turning test of model ship at GM 60cm .....	32
Fig. 31	Turning test of model ship at GM 30cm at maximum heeling angle .....	34
Fig. 32	Heeling angle response of model ship at GM 30cm .....	35
Fig. 33	Turning test of model ship at GM 30cm before rudder to port 15° .....	36
Fig. 34	Rudder turning state before sinking and after salvage .....	36
Fig. 35	Turning test of model ship at GM 30cm after rudder to port 15° .....	37
Fig. 36	Turning test of model ship at GM 20cm at starting time .....	38
Fig. 37	Turning test of model ship at GM 20cm at maximum heeling angle .....	38
Fig. 38	Turning test of model ship at GM 20cm right before rudder 15 degrees to port .....	39
Fig. 39	Turning test of model ship at GM 20cm after rudder 15 degrees to port .....	39
Fig. 40	Comparison of heeling angle responses of model ship between GM 20cm and 30cm .....	40



Fig. 41	Turning test of model ship at GM 20cm at maximum heeling angle with rudder angle of $15^{\circ}$ to starboard .....	42
Fig. 42	Turning test of model ship at GM 20cm with continuous rudder angle of $15^{\circ}$ to starboard .....	42
Fig. 43	Comparison of heeling angle of model ship between rudder angle $35^{\circ}$ and $15^{\circ}$ under GM 20cm .....	43
Fig. 44	Sea trial turning test report(port propeller propulsion) .....	46



# GM 변화에 따른 선박의 선회성능에 대한 연구

김 대 래

한국해양대학교 대학원  
조선해양시스템공학과



## 초 록

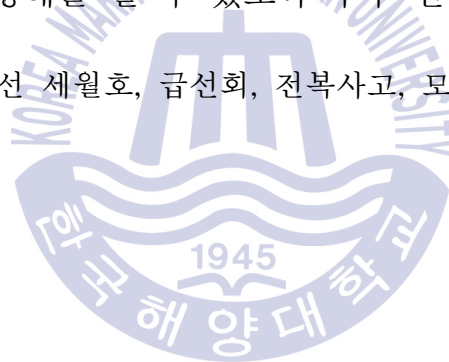
항주 중인 로로 페리선 세월호가 부족한 복원성으로 인하여 선회를 하던 중 급선회가 발생하여 전복된 사고가 발생하였으며, 본 연구에서는 모형선의 선회시험을 통한 객관적인 선회특성을 분석하고자 하였다. 본 연구에서는 사고선박의 선도를 비롯한 도면을 기반으로 3차원 프린터로 모형선을 제작하였고, 2축 1타의 추진장치와 원격조종이 가능한 조타장치 및 실시간 측정이 가능한 계측장치를 부착한 사고선박의 모형선을 이용하여 다양한 GM 변화에 따른 선회시험을 실내수조에서 수행하고 사고선박의 AIS 항적과 비교 검토하여 급선회에 따른 선회특성을 분석하였다.

본 연구에서는 실선 GM 90cm, 60cm, 30cm 및 20cm를 설정하여 우현 전타 35°의 타각을 사용하여 선회시험을 수행하였고, GM이 작은 경우에는 최대 횡경사가 발생한 후 좌현 15°의 타각을 적용하는 시간과 타각의 크기에 따른 선회궤적을 사고선박의 AIS 항적과 비교 검토하여 선회특성을

분석하였다. 실선의 GM이 작아질수록 선회궤적의 선회경도 점점 작아졌고 GM이 20cm이고 최대 횡경사가 발생한 후 좌현 15°의 타각을 빠르게 적용하였을 때 모형선의 선회궤적은 사고선박의 AIS 항적에 가장 근접하였다. 또한 급선회 시 최대 횡경사의 크기는 실선 GM의 크기에 좌우되었고, 선회경은 타각의 크기에 주로 좌우된다는 것을 본 모형선 선회시험을 통하여 확인할 수 있었다.

이상의 모형선 선회시험을 통하여 사고선박의 급선회 사고에 따른 선회특성을 상당히 합리적인 추정을 할 수 있었으나, 보다 큰 모형선을 사용하여 보다 더 더 합리적인 선회특성을 추후 연구로 추정하고자 한다. 또한 간이 GM 산정방식을 기계화와 디지털화하여 선박의 GM이 항상 자동적으로 표시될 수 있는 계기를 개발하여 국내의 연안 로로 페리선 등에 적용하여 보다 안전한 항해를 할 수 있도록 추후 연구를 수행할 것이다.

**KEY WORDS** : 로로 페리선 세월호, 급선회, 전복사고, 모형선 선회시험, 선회경, 선회특성, GM, AIS 항적



# A Study on Turning Ability of Ship according to GM Variance

Kim, Dae-Rae

Department of Naval Architecture & Ocean Systems Engineering  
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University



## Abstract

Rapid turning and capsizing accident of ro-ro ferry Sewol occurred due to the very poor stability small rapid turning, and its objective turning characteristics was analyzed through the turning test of its ship model in this study. Its ship model was produced by the 3D printer based on the drawings including hull lines, and was attached by the propulsion devices of 2 propeller and 1 rudder, remote controllable steering gear, and real time measurable instrumentation devices. Turning test was carried out according to GM variance using this ship model in the interior ocean basin, and turning characteristics of rapid turning was analyzed comparing its turning circle with its AIS track.

In this study, turning test was performed according to full-scale ship GM

variance, 90cm, 60cm, 390cm and 20cm, using hard starboard rudder angle,  $35^{\circ}$ . In the case of small GM, turning characteristics was also analyzed by comparing its turning path with AIS track according to turning time of rudder angle  $15^{\circ}$  to port after the maximum heeling angle, and to the rudder angle. As GM became smaller, turning circle of turning path was also reduced gradually, and the turning path of ship model was most close to the AIS track in the case of turning rudder angle  $15^{\circ}$  to port right after the maximum heeling angle at GM 20cm. It was confirmed through this turning test of ship model that the maximum heeling angle was dependent upon the full-scale ship GM magnitude, and that the turning circle, upon the rudder angle.

Even though the turning characteristics of rapid turning accident could be reasonably analyzed, future study of more exact and reasonable prediction of turning characteristics will be carried out using more larger size of ship model. For the more safer voyage of domestic coastal ro-ro ferry ships, GM auto-indicator with mechanization and digitalization of GM estimating equation will be also developed for the future study.

**KEY WORDS** : Ro-Ro Ferry Sewol, Rapid Turning, Capsize Accident, Turning test of Ship Model, Turning Circle, Turning Characteristics, GM, AIS Track

## 1. 서 론

해상은 육상에 비하여 해상고유의 위험(perils of the seas)인, 파도(wave)와 너울(swell) 등은 물론이고 돌풍(gust)과 태풍(typhoon) 같은 다양한 위험이 존재할 뿐만 아니라, 운항하는 선박 자체의 결함이나 화물 자체의 문제 또는 화물 선적 상태의 부적합 등으로 인하여 전복(capsize), 침몰(sinking) 등 다양한 사고를 초래할 수 있는 수많은 위험이 존재한다(한국무역협회, 2016). 또한, 다양하고 거대한 위험이 존재하는 해상을 운항하는 선박의 항해사는 선박에 대한 지식은 물론이고 항해하는 해상 노선의 시시각각 변화하는 여건을 잘 숙지하고 정확한 자료를 토대로, 안전운항에 있어 현장의 객관적인 여건을 감안한 올바른 판단과 결정을 지체 없이 결정하여야 한다. 이러한 다양한 이유로 인하여, 해상에서의 해난사고 역시도 유사한 사고는 있을 수 있지만, 동일한 선박의 같은 사고는 사실상 찾아보기 어렵다.

IMO(International Maritime Organization, 국제해사기구)는 선박의 부족한 조종 성능(manueverability)으로 인하여 발생하는 해난사고 및 해양환경 오염을 방지하기 위하여 갖추어야 할 최소한의 조종성능에 관한 지침을 제정하였다. 1993년 선박의 조종성능에 대한 잠정적인 기준인 Resolution A751(18)을 초안으로 채택하였다(IMO, 1993). 이후 2002년 MSC(Marine Safety Committee) 76차 회의를 통해 선박의 조종성능에 관한 기준인 Resolution MSC.137(76)을 확정하였다(IMO, 2002a). 타와 추진기를 장치한 길이 100m 이상의 일반선박과 선체의 길이에 상관없이 모든 케미컬 탱커(chemical tanker)와 가스 운반선(gas carrier)에 적용된다. IMO은 선박의 3가지 조종성능인 선회성능(turning ability), 변침 및 보침성능(course changing and keeping ability), 정지성능(stopping ability)에 대한 기준을 제시하고 있다. 이러한 기준을 만족하는지 확인 및 평가하기 위하여 선회성능에 관해서는 선회시험(turning test), 변침 및 보침성능에 관해서는 지

그재그 시험(zig-zag test), 정지성능에 관해서는 정지시험(stopping test)을 실시하도록 규정하고 있다(IMO, 2002b). 그리고 이러한 선박의 조종성능 평가는 일반적으로 선박의 건조 후 시운전(sea trial test)을 통하여 수행된다.

IMO가 규정한 선박 조종성능 중에서 그 첫 번째인 선회성능은 선박이 일정 타각을 사용하였을 때 그 선회 정도를 이용하여 판별할 수 있는 성능이다. 선회성능은 Fig. 1에서와 같이 선회시험을 통하여 알 수 있고, 선회성능의 지표로 선회종거(advance)  $D_A$ , 선회횡거(transfer)와 선회경 또는 전술선회직경(tactical diameter)  $D_T$ 등이 사용되고 있다. 선회종거와 선회횡거는 원침로에서 회두가  $90^\circ$  이루어질 때까지의 각각의 종축 및 횡축거리이며, 선회경(전술선회직경)은 회두가  $180^\circ$  이루어질 때까지의 횡축거리를 의미한다. 각각의 거리에 따라 선박의 선회성능을 판단할 수 있고, 각 거리가 짧을수록 우수한 선회성능 지표를 의미한다. 이러한 선회성능 지표가 우수하면 급한 선회가 가능하여 비상 시 선박의 충돌회피가 가능하다(IMO, 2002b; 한국해양연구원, 2002).

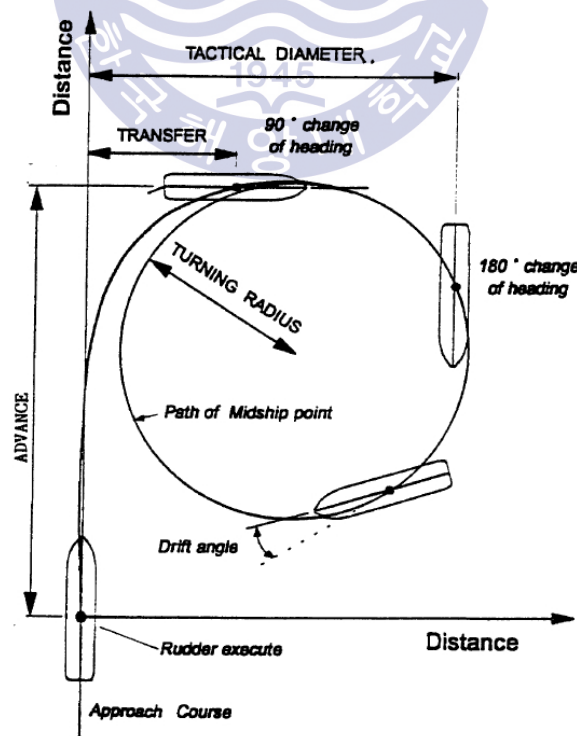


Fig. 1 Definitions of turning test(IMO, 2002b)



IMO에서는 사용 타각  $10^{\circ}$  에 의한 초기 선회성능(intial turning ability)과 최대 타각(maximum rudder angle) 또는 전타(hard rudder angle)  $35^{\circ}$  에 의한 정상 선회성능(normal turning ability)의 2가지 선회성능의 기준을 구분하여 적용한다. 초기 선회성능 기준일 경우 좌현 또는 우현  $10^{\circ}$  타각을 발령한 후 선수 각이  $10^{\circ}$  에 도달할 때까지의 항주거리가 선박길이의 2.5배 이하이어야 한다고 규정하고 있다. 정상 선회성능은 Fig. 1에서와 같이 선회시험을 통해 측정된 선회종거와 선회경의 길이로 평가되며 선회종거는 선체 길이의 4.5배 이하, 선회경은 5.0배 이하로 규정하고 있다. 선회시험 시 Fig. 1과 같이 선박의 무게중심의 선회궤적을 선회권(turning circle)이라 한다. 선박의 선회 각속도가 일정하게 되고 그때의 선회궤적은 완전한 원에 가깝고 그때의 선회항적의 직경을 정상 선회경(final diameter)이라 한다(IMO, 2002b; 한국해양연구원, 2002).

선박의 선회경은 항해전속전진 상태에서 보통 선체 길이의 3~4배 정도이고 선회종거의 1.25배 정도이지만 선박의 시운전 자료를 참조한다(윤점동, 2016). 과거에 발생한 전복사고에서 급선회 시의 선회경은 시운전 시의 것 보다 일반적으로 현저히 작은 경향이 있었다. 또한 과거에는 선박의 전복사고 발생 시 선박의 선회궤적을 추적할 장비나 계기가 없었지만, 2000년대 이후에 AIS(Automatic Identification System, 선박자동식별시스템)가 선박에 보급된 이후 급선회에 따른 전복사고 시의 선회경이 시운전 시의 선회정보다 상당히 작다는 것을 확인할 수 있게 되었다(윤점동, 2016).

선박의 급선회 시 선회궤적과 횡경사의 응답에 영향을 미치는 것은 주요인자로서는 사고 당시의 선박의 복원성의 지표인 GM, 타각, 선속 및 화물의 고박상태 등을 들 수 있다(Lee et al. 2017; 해양안전기술, 2016). 2014년 4월 16일에 발생한 로로 페리선(ro-ro ferry) 세월호의 급선회에 따른 전복 및 침몰사고 후 급선회 사고의 원인을 분석하기 위하여 여러 관련기관에서 수치 시뮬레이션을 수행하였다(선박해양플랜트연구소, 2014; 합동수사본부 전문가 자문단, 2014; 해양안전심판원 특별조사부, 2014, 해양안전기술, 2016). 사고 당시의 선적상태는 화주와의 확인과 CCTV 등을 통하여 어느 정도 파악할 수 있었지만 객관적으로 정확한 GM의 추정과 급선회 시뮬레이션의 신뢰성을 확보할 필요가 있었다. 이



를 위하여 중앙해양안전심판원의 지원 하에 사고선박의 객관적인 선회특성을 파악하기 모형선을 사용하여 GM 변화에 따른 선회시험을 수행하였다.

본 논문의 목적은 로로 페리선 세월호의 급선회 전복사고의 객관적인 선회특성을 추정하기 위하여 사고선박 모형선을 사용하여 GM 변화에 따른 선회시험을 수행하고, 세월호의 전복사고 시의 AIS 항적과 비교 검토를 통하여 급선회에 따른 선회특성을 분석하고자 하였다. 선박의 운동특성은 선박의 선형, 추진기 장치, 조타장치, 복원력, 선속 등이 복합적으로 관련되어 있기 때문에, 선회시험에서도 최대한 실선과 같은 결과를 도출할 수 있도록 하였다. 사고선박의 선도(lines)를 비롯한 도면을 기반으로 하여 Auto Cad와 Sketch-up 3차원 소프트웨어로 구현하여 1/150 축척의 모형선을 3차원 프린터로 제작하였다. 사고선박과 최대한 유사한 선박의 선회운동과 조종이 가능하도록 원격으로 조종되는 2축 추진동력장치와 프로펠라 및 조타장치를 설치하였고 이러한 조타장치는 기계적인 메커니즘으로 연결하여 조타지시기와 동시에 연동되도록 하였다.

사고선박의 원격조종 모형선의 선회시험을 수행하기 전에 과거에 발생한 케미컬 탱커 Eastern Bright의 선측탱크에 유입된 해수로 인하여 경사된 이후 침몰된 사고(목포해심, 2008)의 선회궤적이 선회시험의 선회경에 비하여 작았다는 사실에 착안하여 이 선박의 유사 모형선의 횡경사에 따른 단순 항주시험을 통하여 외방경사와 선회경의 변화에 대한 운동특성을 고찰한 후, 세월호 사고선박의 원격 조종과 실시간 측정이 가능한 모형선의 선회시험을 수행하여 선회특성을 분석하였다. 또한, 사고선박 모형선의 복원력 척도인 GM을 설정을 위하여 모형선의 무게중심을 수직으로 이동시킬 수 있는 장치를 설치하였고, 경사시험을 위한 장비도 장착하여 실선의 GM과 일치시킬 수 있도록 하였다. 모형선의 선회시험 시 타각과 횡경사 및 선수각을 측정 할 수 있는 장치와 이를 연속적으로 기록할 수 있도록 하여 실시간의 결과를 도출할 수 있도록 하였다.

기하학적으로 상사인 실선과 모형선, 즉 Floude 수가 동일한 경우 두 선속은 실선과 모형선의 길이 치수의 제곱근에 비례하면 잉여저항은 길이 치수의 세제곱에 비례한다는 Floude 비교법칙에 의하면 모형선의 대응선속(corresponding speed)은 실선의 선속을 모형선 선속의 축척의 제곱근에 반비례하게 된다. 복원

성의 주요인자인 GM은 모형선의 크기에 따른 제한으로 유체의 표면효과(surface effect)와 차량 및 화물의 고박상태에 따른 영향 등을 정확히 구현하기 어려워 이러한 효과를 고려한 GoM에 준하도록 사고선박의 GM을 90cm, 60cm, 30cm 및 20cm으로 설정하였다. 실선과 모형선의 경사시험 시 같은 횡경사가 되도록 모형선의 GM을 산출하여 선회시험을 수행하였다. 모형선의 선회시험은 바람과 같은 외력의 영향을 최소화하기 위하여 실내수조를 선정하였고, 모형선의 선회궤적을 촬영하기 위한 캠코드를 설치할 수 있는 한국해양수산연수원 용당 캠퍼스의 ROV 실내수조에서 중앙해양안전심판원의 지원 하에 중앙해양안전심판원과 해기연수원 관련자 40여명이 참관하는 가운데 수행하였다.

본 연구의 모형선 선회시험에서 우현  $35^\circ$ 의 타각으로 GM의 변화에 의한 선회경과 외방경사의 선회특성을 분석하였고, 사고 당시의 복원력의 상황을 추정할 수 있었다. 또한 2축 추진기 선박의 선회시험 중  $20^\circ$  이상의 크게 횡경사된 상태에서의 선회특성도 분석할 수 있었고, 일반적인 단일 추진선박에 비하여 선박의 선회경에도 더 많은 영향을 주는 현상도 확인할 수 있었다. 본 연구에서 모형선의 축적을 1/150로 하게 된 이유는 선회시험을 할 수 있는 실내수조를 찾기가 어려웠고, 모형선의 이동의 편의성도 부차적인 요인이 있었지만, 이러한 축적비의 소형 모형선을 이용한 선회시험을 통하여 GM의 변화에 의한 선회경과 외방경사 현상에 대한 경향과 사고 당시의 사고선박의 복원력을 어느 정도 합리적으로 추정할 수 있었다. 향후 본 연구의 모형선에 비하여 보다 큰 모형선을 제작하여 모형선의 유체의 축소효과와 유체의 표면효과와 차량 및 화물의 고박상태 등에 따른 영향을 고려한 모형선의 선회시험을 수행하여 보다 더 정확한 선회특성을 수행하고자 한다.

한국해운조합의 2016년 통계수치에 의하면 국내 전체 인구의 약 1/3 정도는 연안 로로 페리선을 이용하고 있으므로, 이러한 선박의 안전성은 국민의 해상 안전성과도 직결된다고 보아도 무방할 정도이다. 그러나 국내 정기 연안 로로 페리선 등은 정해진 스케줄에 따라 운항하므로, 선적 화물의 명세는 물론이고 GM을 정확히 추정하지 못하고 운항하는 상황이라 유사 사고가 발생할 가능성이 여전히 높은 상황이다. 이에 따른 유사사고 재발을 방지하기 위하여 간이

GM을 쉽게 추정할 수 있는 간이 계기장치가 필요가 있을 것이며 이를 위한 연구도 향후 수행할 필요가 있을 것이다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 1장에서는 로로 페리선 세월호의 급선회에 따른 전복사고의 주요인자들과 모형선의 선회시험의 필요성과 목적 및 수행내용 등에 대하여 기술하였고, 2장에서는 사고선박의 AIS 항적자료에 대하여 고찰하였다. 3장에서는 횡경사가 큰 모형선의 일반 항주실험에 대하여 먼저 살펴보고, 실제 사고선박의 급선회에 따른 일반적인 선회특성을 미리 추정하였다. 4장에서는 원격 조정이 가능한 모형선의 제작 과정, 모형선의 무게중심 조정과 원격 조종 및 측량 장비 등을 소개하고, GM의 변화에 따른 선회시험의 결과들을 소개하고 사고선박의 사고 당시의 복원성 등을 추정하였다. 본 논문의 결론부인 5장에서는 본 연구를 통하여 도출된 주요한 결과를 요약하였다.



## 2. 사고선박의 AIS 항적자료에 대한 고찰

AIS는 선박의 항해안전 및 해상에서의 테러방지를 위하여 IMO가 해상인명안전협약(SOLAS)을 개정하여 채택한 항해장비로서, 선박의 선명, 제원 등 선박 및 운항정보 그리고 보안정보를 VHF 데이터 통신을 통해 선박-선박/육상 간 송수신하는 장치이다. AIS는 물체의 존재를 식별해 주는 레이더보다 한 단계 발전된 선박식별 장치이며, 연안 해역 광역관제, 수색·구조지원 및 레이더와는 별개의 선박통항관제(VTS) 수단 등을 제공한다. IMO는 해상에서 안전과 보안강화를 목적으로 2000년 SOLAS를 개정하여 AIS 설치를 의무화함에 따라 우리나라도 선박설비 기준에 따라 모든 여객선에 2005년 12월 31일까지 AIS를 설치하도록 하였다.

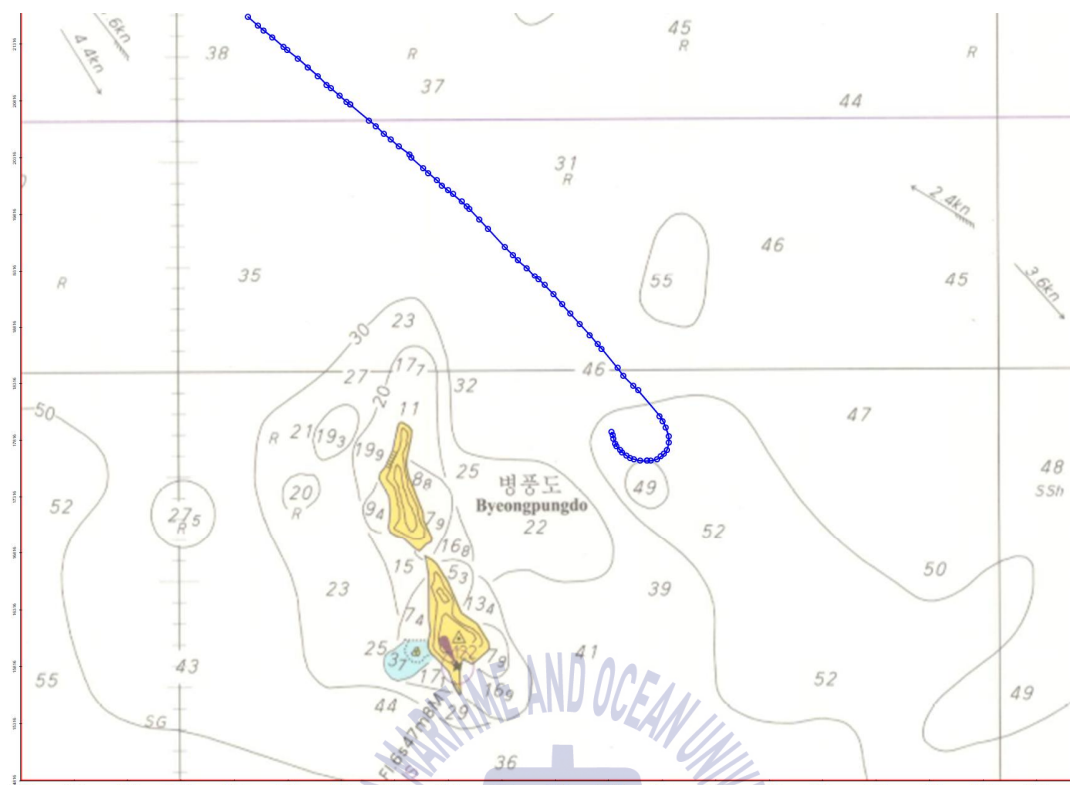
선박의 사고 시의 선회궤적과 횡경사 등의 선회특성을 파악하기 위하여 실제로 침몰사고가 발생한 로로 페리선 세월호의 급선회에 의한 전복사고 시의 AIS 항적과 건조 후 시행하는 시운전 선회시험 중 우회두의 자료를 입수하여 비교 검토하였고, 사고선박의 모형선을 이용한 선회시험의 특성을 비교 검토하고자 하였다. 2014년 4월 16일에 발생한 사고선박 세월호의 AIS 항적자료는 AIS 항적 자료를 전문적으로 취급하는 영국의 업체로부터 구매·입수하였고, 목포 해양안전심판원으로부터 입수한 자료와 비교한 결과 큰 차이는 없었다. 입수된 AIS 자료 중 급선회 시의 부분만을 요약 발췌하면 Table 1과 같다. Table 1의 AIS 자료를 자체 개발한 컴퓨터 플로팅 프로그램에 입력하여 도출된 결과는 Fig. 2와 같고 선회경은 약 450미터 정도이다.

사고 직후 발표된 AIS 데이터 항적에서 사고 당시 물리적으로 불가능한 움직임이 발견되어 분석한 결과 08:52:02 이후 AIS 데이터의 선수각(HDG) 정보의 오류를 발견하여 헬기의 동영상 자료와 계산된 선회율을 고려한 새로운 사고 재현 시뮬레이션을 구현하여 Fig. 3과 같이 수정 보완하였다(임남균, 2015).

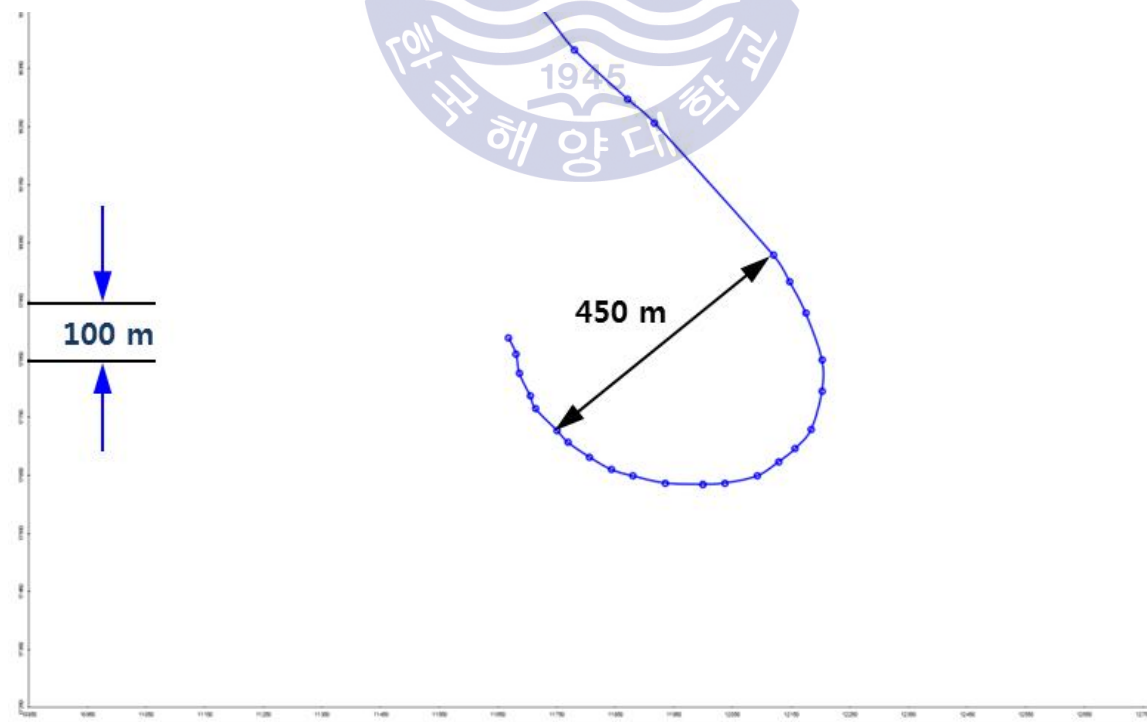
**Table 1** AIS data of rapid turning casualty of ro-ro ferry Sewol

time	CO	HDG	velocity	latitude	longitude	angular speed
8:48:31	135.2	139	17.5	34.16467	125.9622	0.0000
8:48:38	134.7	140	17.4	34.16430	125.9627	0.1429
8:49:13	146.1	150	17.1	34.16225	125.9649	0.2857
8:49:19	149.2	155	16.9	34.16184	125.9652	0.8333
8:49:25	152.8	161	16.7	34.16142	125.9655	1.0000
8:49:26	153.7	162	16.7	34.16135	125.9655	1.0000
8:49:30	159.1	166	16.5	34.16107	125.9657	1.0000
8:49:36	169.8	178	16.0	34.16063	125.9658	2.0000
8:49:37	171.5	180	15.8	34.16056	125.9658	2.0000
8:49:39	175.2	184	15.6	34.16042	125.9658	2.0000
8:49:40	182.0	199	15.2	34.16025	125.9657	15.0000
8:49:41	183.5	213	15.0	34.16018	125.9657	14.0000
8:49:43	182.3	191	15.0	34.16014	125.9658	-11.0000
8:49:48	195.8	229	14.3	34.15972	125.9656	7.6000
8:49:51	206.0	234	13.4	34.15955	125.9656	1.6667
8:49:58	224.9	242	11.8	34.15925	125.9653	1.1429
8:50:03	228.4	246	11.5	34.15915	125.9652	0.8000
8:50:06	232.6	249	11.3	34.15905	125.9650	1.0000
8:50:09	243.7	251	10.7	34.15888	125.9647	0.6667
8:50:13	247.4	254	10.7	34.15883	125.9646	0.7500
8:50:18	250.1	258	10.7	34.15878	125.9644	0.8000
8:50:21	257.1	260	10.3	34.15872	125.9640	0.6667
8:50:23	261.1	262	10.5	34.15872	125.9000	1.0000
8:50:29	266.1	263	10.4	34.15870	125.9636	0.1667
8:50:32	266.1	265	10.4	34.15870	125.9636	0.6667
8:50:38	273.9	265	10.4	34.15872	125.9630	0.0000
8:50:40	274.8	266	10.5	34.15872	125.9629	0.5000
8:50:49	282.7	270	10.6	34.15880	125.9624	0.4444
8:50:51	284.0	272	10.6	34.15883	125.9623	1.0000
8:50:57	291.0	259	10.6	34.15893	125.9619	-2.1667
8:51:02	295.0	249	10.3	34.15902	125.9617	-2.0000
8:51:03	296.6	248	10.2	34.15905	125.9616	-1.0000
8:51:06	300.7	247	10.0	34.15912	125.9615	-0.3333
8:51:11	306.3	246	9.6	34.15925	125.9612	-0.2000
8:51:15	310.5	246	9.2	34.15935	125.9611	0.0000
8:51:18	312.9	245	9.0	34.15943	125.9610	-0.3333
8:51:21	316.1	245	8.7	34.15953	125.9609	0.0000
8:51:27	321.2	245	8.2	34.15970	125.9607	0.0000



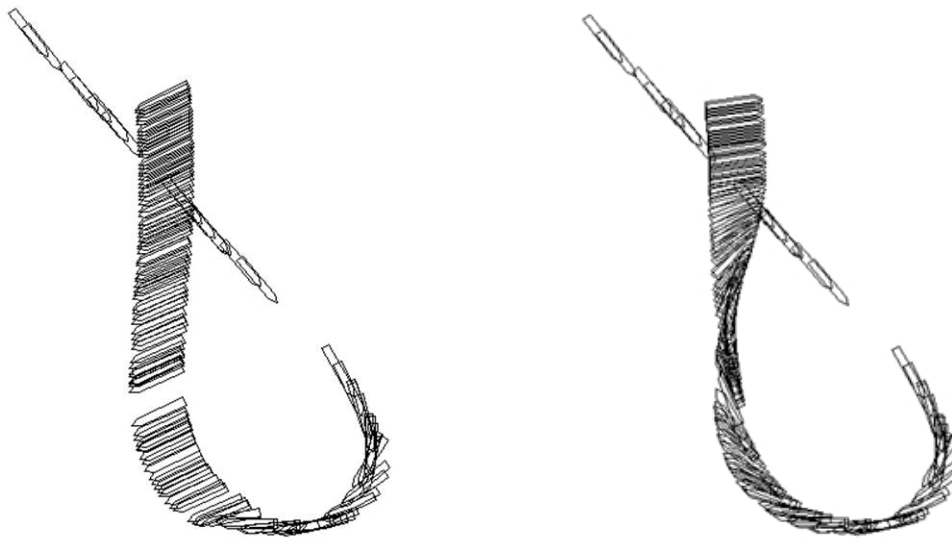


(a) over view



(b) close view

Fig. 2 Plotting of AIS track



(a) original HDG (b) correction of HDG  
**Fig. 3** AIS tracks between original and correction of HDG

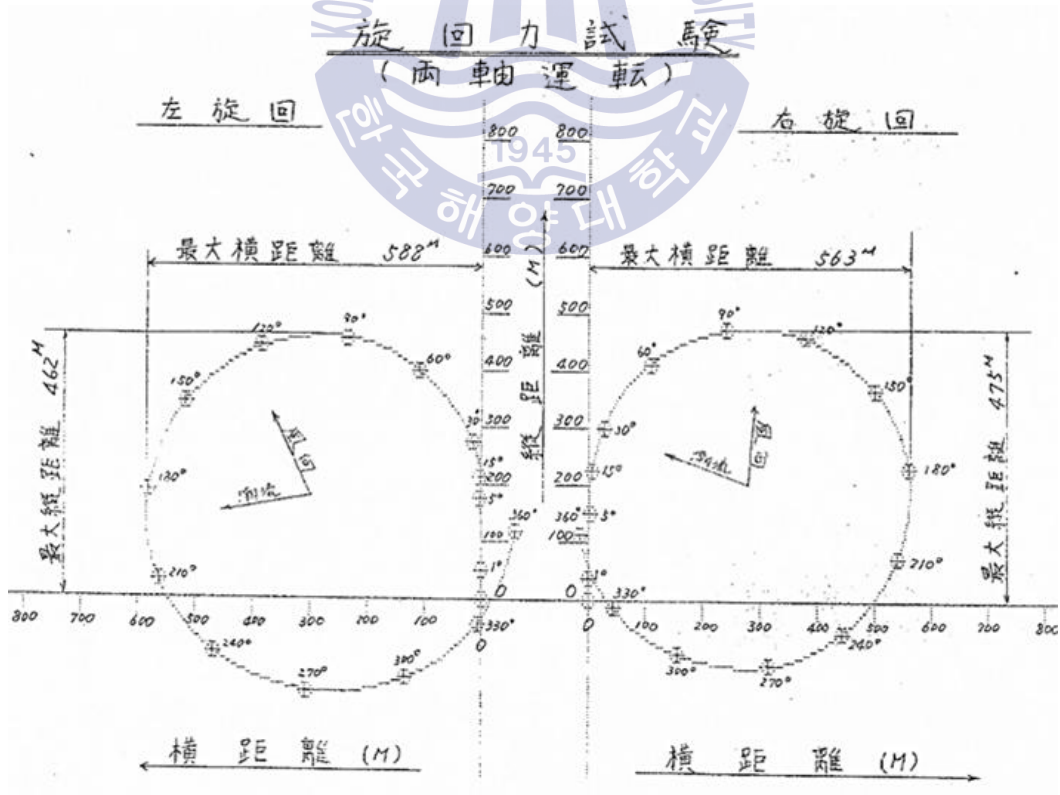
제시된 사고선박 세월호의 선회궤적은 사고 직후 발표된 다양한 증거 사진과 일치하는 동쪽으로 향하고 있음을 Fig. 3(b)에서와 같이 확인하였으며, 본 연구의 모형선 선회시험에서도 이러한 선박의 선수각의 거동을 분석하는데 기여할 것으로 사료된다.

사고선박의 시운전 시 선속 23.23노트에서의 전타  $35^{\circ}$  로 우선회 및 좌선회 시험의 선회 결과는 Fig. 4와 같다. Fig. 5에서와 같이 우회두 선회경이 약 563m인데 비하여 사고선박의 급선회 시의 선회경(점선)의 약 450m인 것과 비교하면 약 113m(20.07%) 정도가 작다는 것을 알 수 있다. 사고선박의 시운전 시는 2개의 추진기에 추력을 주었을 때의 최대 횡경사로서 Fig. 4(a)에서와 같이 약  $7.5^{\circ}$  이고, 급선회 전복사고 시에서는 약  $35^{\circ}$  이상인 것으로 알려져 있다. 이를 미루어보아 시운전 시의 GM에 비하여 전복사고 시의 GM은 크게 작을 것으로 추정된다. 시운전 시에는 우현 전타를 하였지만 급선회 전복사고 시에는 정확한 타각을 추정하지 못하고 있다.

5-1 旋回試験 (両車由)

旋 回 方 向	左		右	
旋回前の速力 (対水速力)	23.23 ノット		23.23 ノット	
舵取発令より舵取終了までの時間	1.0		1.0	
ヘルム角	35°		35°	
実際ヘルム角	35°		35°	
油 圧	最大	定常	最大	定常
旋回圏の最大縦距 DA	462 M		475 M	
" 最大横距 DT	588 M		563 M	
DA / Lpp	3.50		4.27	
DT / Lpp	4.45		3.60	
船体最大傾斜	9°		7.5°	
360° 旋回に要する時間	4' - 20" 0		4' - 17" 0	

(a) test summary



(b) turning test circles

Fig. 4 Sea trial turning test report(twin propeller propulsion)



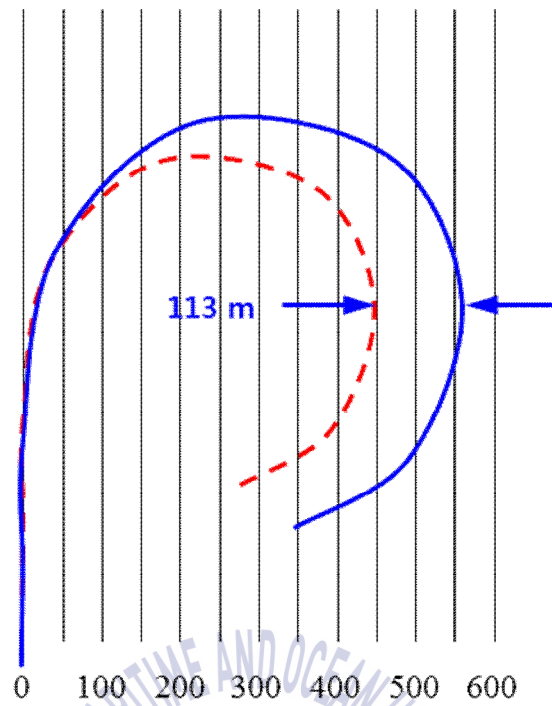
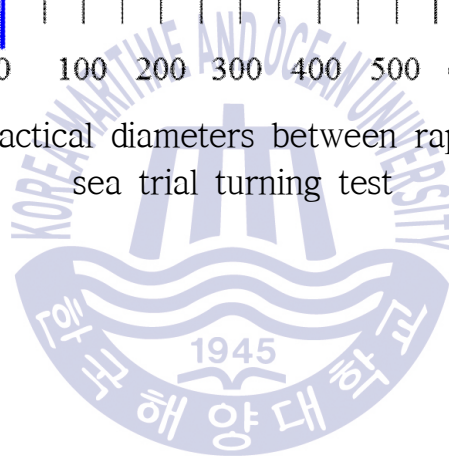


Fig. 5 Comparison of tactical diameters between rapid turning accident and sea trial turning test

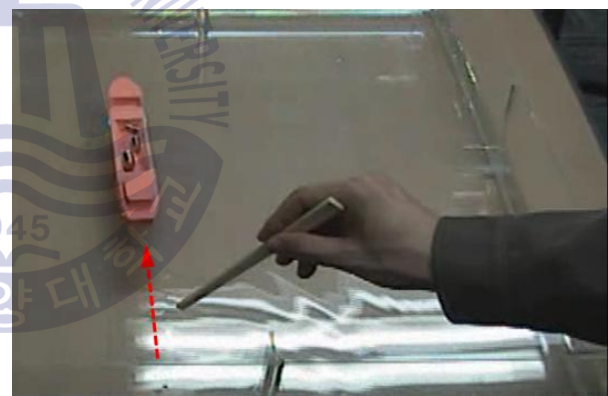


### 3. 횡경사 큰 모형선의 일반 항주시험

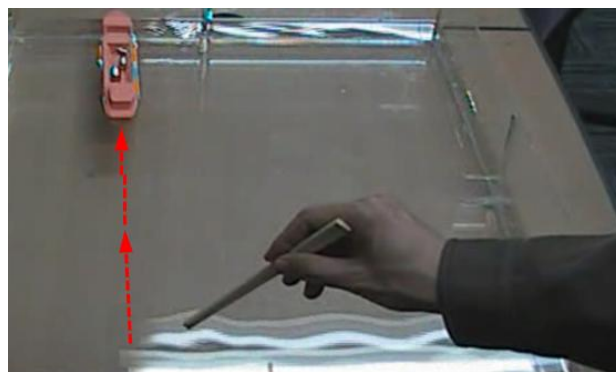
추진동력을 갖춘 모형선의 급선회 선회시험을 수행하기 전, 케미컬 탱커 (Eastern Bright, GRT: 1,715ton, LOA: 82.0m, breadth: 12.4m, depth: 6.4m)의 간이 모형선이 횡경사가 클 경우에 대한 일반 항주특성에 대하여 예비적으로 실험을 수행하였다. 간단한 항주시험이었지만 횡경사가 큰 경우에는 타를 전혀 사용하지 않았음에도 불구하고 횡경사의 반대 방향으로 선회하는 것을 확인할 수 있었다. 우선 횡경사가 없는 직립된 모형선을 주행시켜보면 Fig. 6에서와 같이 직진하는 것을 볼 수 있다.



(a) stationary state



(b) intermediate state



(c) final state

Fig. 6 Running test of simple model ship with upright state

간이 모형선의 좌현 횡경사가 Fig. 7에서와 같이 약 22도 정도로 심할 경우에는 자유 주행 시 Fig. 8에서와 같이 반대 방향인 우현으로 현저하게 선회하는 항주 특성을 확인할 수 있다. 반면에 우현으로 심하게 횡경사된 경우에는 Fig. 9에서와 같이 좌현으로 심하게 선회하는 것을 볼 수 있다.

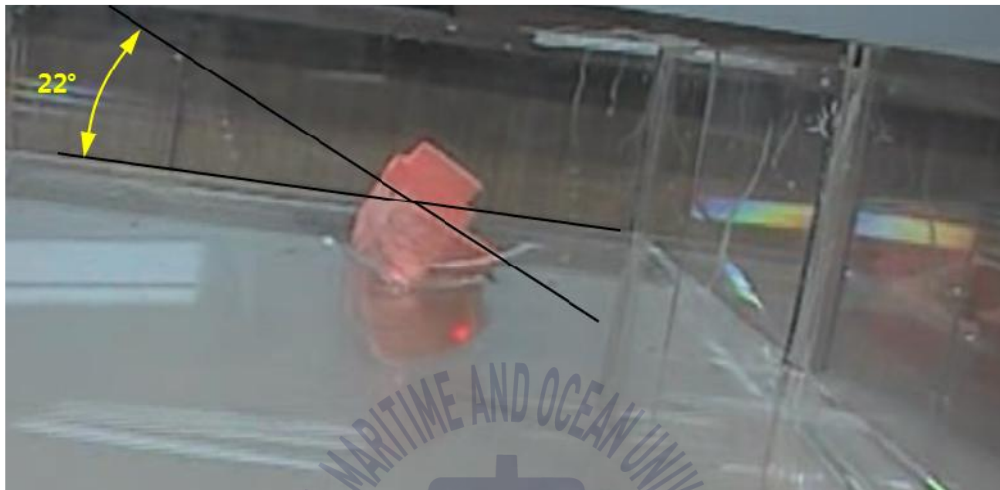
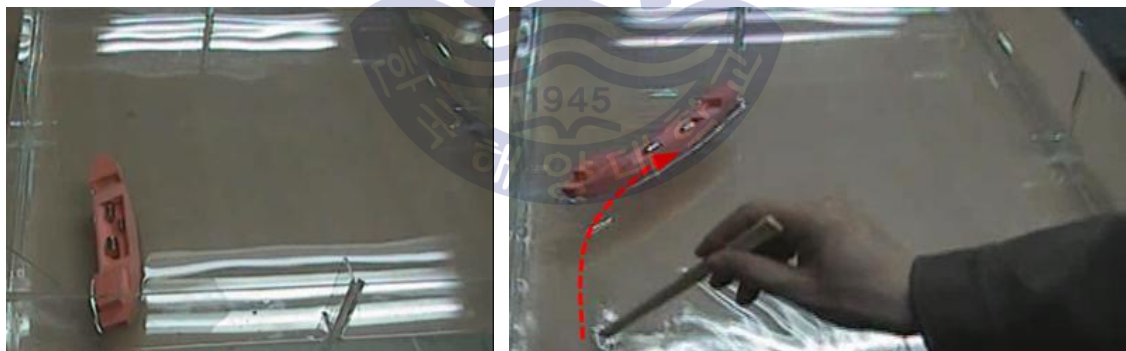


Fig. 7 Simple model ship with heeling angle  $22^{\circ}$  to port



(a) initial state

(b) intermediate state

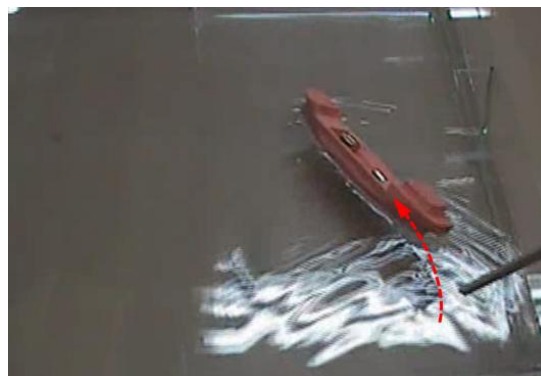


(c) final state

Fig. 8 Running test of simple model ship with heeling angle  $22^{\circ}$  to port



(a) initial state



(b) intermediate state



(c) final state

**Fig. 9** Running test of simple model ship listed to starboard

이와 관련하여 Fig. 10에서와 같이 우현으로 횡경사된 일반적인 컨테이너 선박의 수면 하에 잠긴 형상에서 볼 수 있듯이 선박의 수면하부의 우현 측이 상당히 수면 하에 잠기게 되고, 좌현 측의 상당부분이 수면상부에 위치해 있다. Fig. 11에서와 같이 선수부를 정면에서 보면 우현은 좌현보다 수면아래의 표면 길이가 더 길다는 것을 알 수 있고, 이로 인하여 Fig. 12에서와 같이 우현부의 해수의 흐름이 좌현부보다 더 빠르게 되어 압력이 더 저하하게 되어 선박은 우현으로 선회하게 된다는 것을 확인할 수 있다.

따라서 선박은 우경사가 심한 경우에는 조타를 사용하지 않아도 좌회두하게 된다는 것을 논리적으로 이해할 수 있다는 것을 간이 모형선의 일반 항주시험에서 확인할 수 있었고, 선박의 횡경사 정도가 커짐에 따라 그 선회경도 더 작아져 급선회가 발생할 것이라는 것도 추정할 수 있을 것이다.

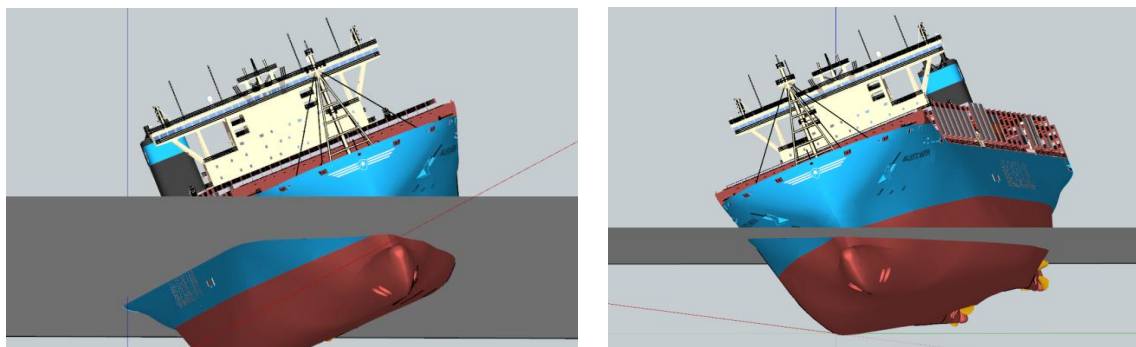
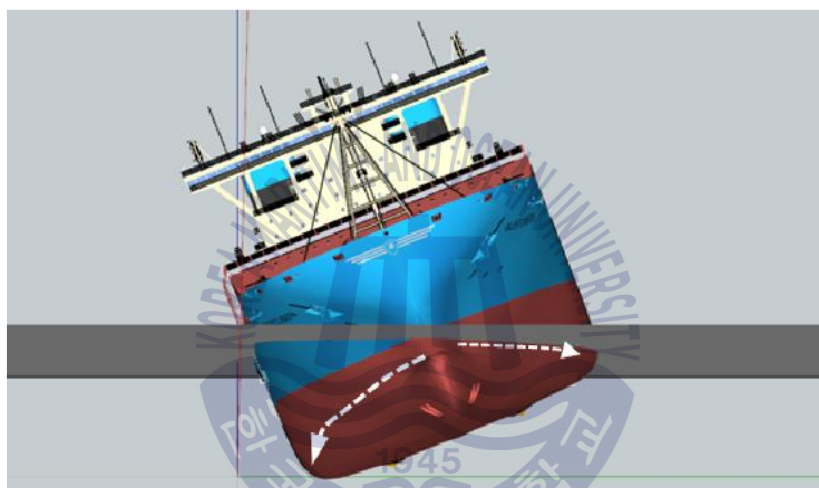
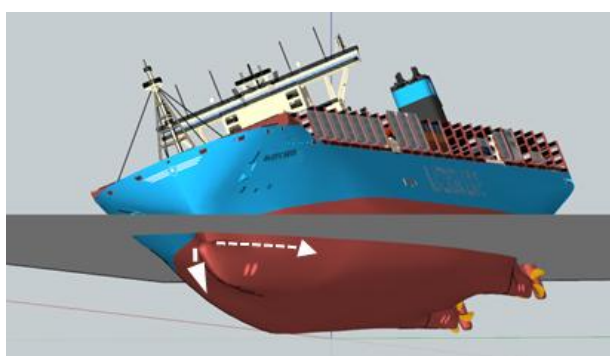


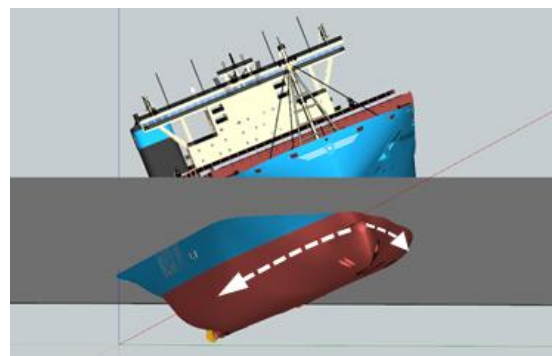
Fig. 10 Submerged configuration of container ship listed to starboard



(a) front view



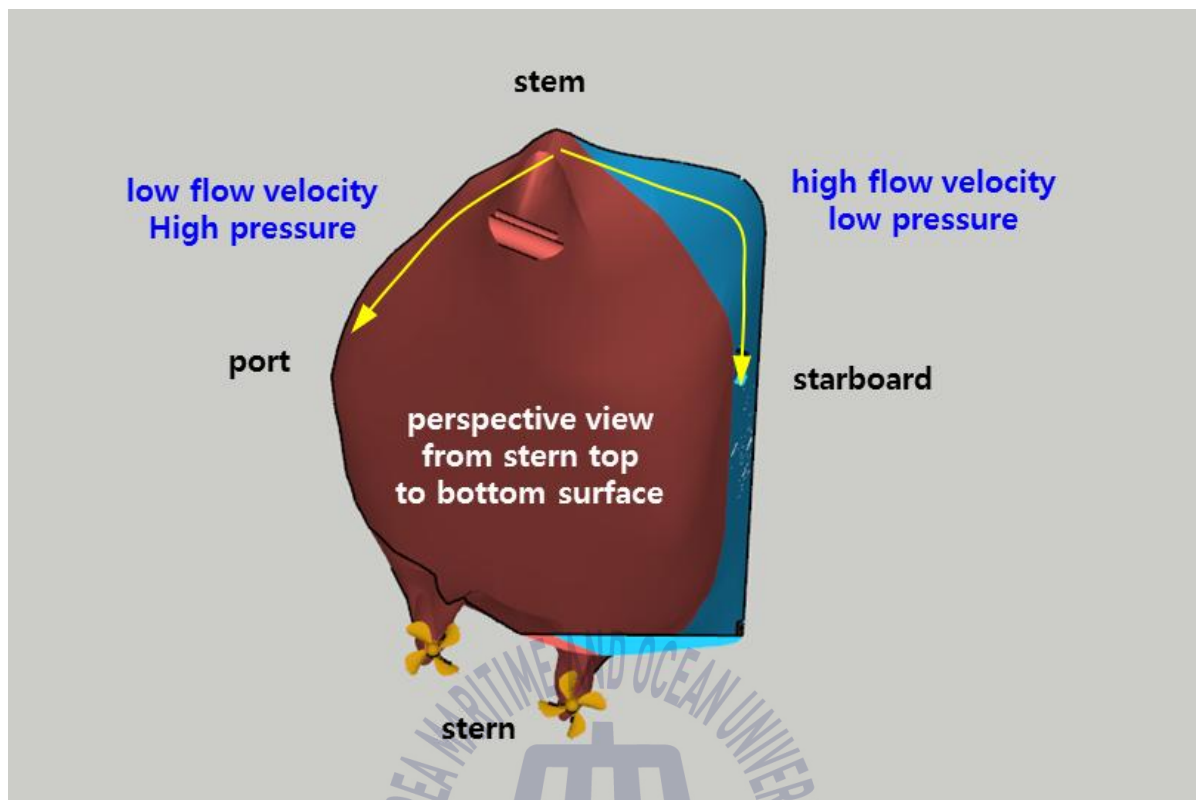
(b) stem port view



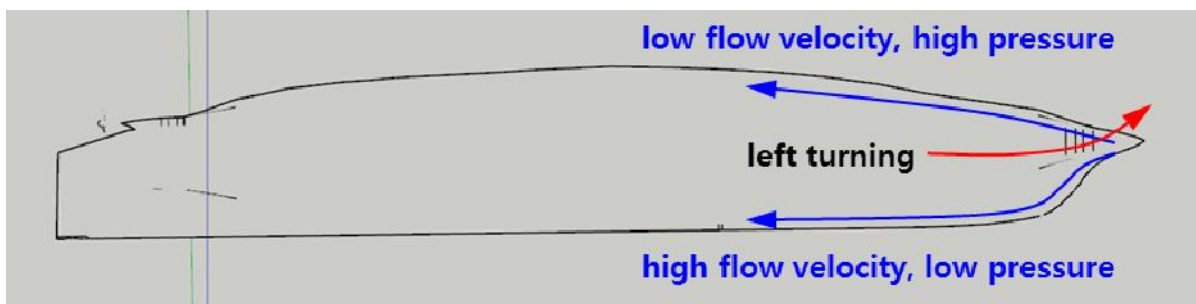
(c) stem starboard view

Fig. 11 Submerged contour of container ship listed to starboard





(a) flow velocity



(b) pressure distribution

Fig. 12 Flow velocity and pressure distribution along submerged surface of container ship listed to starboard

선박에 횡경사가 대각도로 심하게 발생하는 주된 경우는 다음과 같이 크게 2가지로 나누어 볼 수 있다. 첫째는 어떠한 이유로 화물이나 발라스트의 좌·우현 평형이 심하게 차이가 발생하는 경우이다. 과거의 질산을 선적한 케미컬 탱커 Eastern Bright의 경우에서와 같이 비어 있던 측면 발라스트 탱크(side ballast tank)에 해수가 신속하게 다량 유입되어 횡경사가 심한 상태에서 급선회 후 침몰한 사건과 같은 경우이다(목포해심, 2008). 둘째는 선박의 복원력의 척도인 GM이 매우 작을 경우 선박의 선회 시 발생하는 외방경사가 크게 발생하거나, 외력 등에 의하여도 횡경사가 크게 발생된 가능성이 더 높다. 만약, 선박의 전복사고 시에 강한 바람과 파도 등의 외력이 크지 않을 경우에도 낮은 복원력에 의하여 횡경사가 크게 발생하게 될 가능성이 크다는 것을 예견된다. 일반적으로 선박의 급선회에 따른 선회성능 특성에 영향을 미치는 주요 인자로서 GM, 타각 및 선속 등을 들 수 있을 것이고 보다 객관적인 분석을 위하여 모형선의 선회시험을 수행하는 것이 필요할 것으로 사료된다.



## 4. 원격조정 모형선의 급선회 선회실험

본 장에서는 급선회에 따른 전복사고가 발생한 로로 페리선 세월호의 AIS 항적을 사용하고, 원격 조정이 가능한 축소 모형선을 제작하여 GM의 변화에 따른 급선회 선회시험을 수행하여 사고선박의 선회특성을 파악하고 급선회에 따른 전복사고의 원인을 추정하고자 한다.

### 4.1 세월호 모형선 제작

사고선박 세월호의 모형선은 Figs. 13과 14에서와 같이 세월호의 선도와 오프셋(offset)을 이용하여 1/150의 축적으로 제작하였다. 모형선의 선체를 3차원으로 프린팅 한 후, 사고선박과 같이 2축 추진기(twin propellers)와 1개의 타를 갖는 2축1타 선박도면에 근거하여 같은 방식으로 제작하였으며 추진장치와 계측장비를 설치하였고 원격조종 장치를 연결하였다. Fig. 14의 사고선박 오프셋을 Fig. 15에서와 같이 Auto Cad로 그래프로 변환하여 선형을 상세히 모델링하였고, 이 선형을 도식화하여 Fig. 16과 같이 Auto Cad의 결과물을 도출하였다. 그리고 Auto Cad에 입력된 자료를 토대로 3D 모델링 프로그램인 Sketch-up 소프트웨어를 이용하여 Figs. 17과 18에서와 같이 3차원 선형 모델링으로 구현하였다. 이를 기반으로 Fig. 19에서와 같이 3D 프린터로 선체의 선수부와 선미부의 두 부분으로 분할 출력 후 Fig. 20에서와 같이 결합하여 제작하였다.



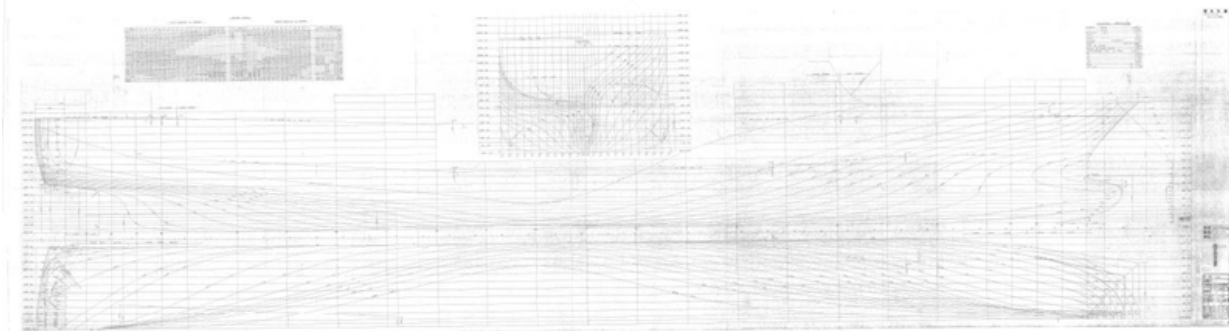


Fig. 13 Lines of ro-ro ferry Sewol

HEIGHT ABOVE B.L. IN METERS

ORD	C.L	HEIGHT ABOVE B.L. IN METERS												S.T.L	DECK		SHELL	ORD		
		0.50 B.L.	1.00 B.L.	1.50 B.L.	2.00 B.L.	3.00 B.L.	4.00 B.L.	5.00 B.L.	6.00 B.L.	7.00 B.L.	8.00 B.L.	9.00 B.L.	10.00 B.L.		S.L C.L	C S.L			DECK C.L	SHELL TOP L
AE	6.500	6.567	6.634	6.700	6.761	6.885	7.010	7.138	7.310	7.573	7.975	8.620	9.770	1.370	10.000	10.000	15.200	15.300	15.300	AE
A	6.152	6.224	6.295	6.366	6.438	6.581	6.727	6.879	7.061	7.305	7.658	8.232	9.297	12.955	"	"	"	"	"	A
A.P	5.800	5.881	5.960	6.040	6.176	6.280	6.440	6.604	6.791	7.013	7.316	7.776	8.701	11.900	"	"	"	"	"	A.P
1/4	0	5.034	5.461	5.627	5.783	5.930	6.105	6.279	6.466	6.675	6.933	7.325	8.075	10.985	"	"	"	"	"	1/4
1/2	0	0.710	4.395	4.998	5.271	5.565	5.765	5.949	6.137	6.337	6.572	6.902	7.526	9.881	10.000	10.000	15.200	15.300	15.300	1/2
3/4	0	0.125	1.510	3.802	4.513	5.094	5.376	5.584	5.786	5.994	6.225	6.525	7.045	9.019	9.816	9.816	15.167	15.267	*	3/4
1	0	0	0.501	1.586	3.067	4.392	4.876	5.130	5.406	5.642	5.880	6.169	6.650	8.500	9.632	9.632	15.067	15.067	*	1
1 1/2	0	0	0.048	0.270	0.704	2.195	3.633	4.100	4.535	4.875	5.170	5.478	5.917	7.931	9.264	9.264	14.868	14.868	*	1 1/2
2	0	0	0.024	0.048	0.106	0.605	1.650	2.727	3.457	3.980	4.388	4.753	5.215	6.600	8.897	8.897	14.668	14.668	*	2
2 1/2	0	0	0	0	0.071	0.119	0.391	1.110	2.075	2.479	3.485	4.978	4.471	5.980	8.529	8.529	14.469	14.469	*	2 1/2
3	0	0	0	0	0	0.167	0.255	0.689	1.680	2.307	3.055	3.735	4.466	5.980	8.160	8.160	14.269	14.269	*	3
4	0	0	0	0	0	0	0.214	0.262	0.309	0.415	0.826	1.621	3.780	5.980	7.670	7.670	14.068	14.068	*	4
4 1/2	0	0	0	0	0	0	0	0.309	0.357	0.533	1.124	3.360	5.980	7.670	7.670	14.068	14.068	*	4 1/2	
5	0	0	0	0	0	0	0.167	0.214	0.262	0.310	0.417	0.781	1.557	4.195	5.980	7.670	14.068	14.068	*	5
6	0	0	0	0	0.071	0.119	0.174	0.340	0.677	1.190	1.811	2.913	4.472	7.762	7.670	7.670	14.068	14.068	*	6
7	0	0	0	0.048	0.099	0.408	1.000	1.813	2.808	3.914	5.119	6.490	8.255	10.400	7.801	7.801	14.068	14.068	*	7
7 1/2	0	0	0.024	0.130	0.326	1.024	2.080	3.287	4.570	5.873	7.169	8.510	10.157	14.575	8.308	8.308	14.068	14.068	*	7 1/2
8	0	0	0.142	0.435	0.880	2.214	3.889	5.558	7.000	8.196	9.237	10.325	11.789	15.668	8.816	8.816	14.068	14.068	*	8
8 1/2	0	0.740	0.503	1.090	1.951	4.708	7.000	8.231	9.149	9.921	10.753	11.910	13.320	16.920	9.000	9.000	14.000	15.700	15.700	8 1/2
9	0	0.360	1.114	2.210	5.955	8.102	9.000	9.735	10.450	11.230	12.161	13.320	14.861	18.150	"	"	14.001	15.701	15.701	9
9 1/4	0	0.572	1.531	2.558	7.830	8.870	9.620	10.325	11.030	11.930	12.913	14.086	15.585	18.150	"	"	14.021	15.721	15.721	9 1/4
9 1/2	0	0.853	2.558	4.183	8.060	8.636	9.858	10.188	10.950	11.776	12.670	13.670	14.823	18.150	"	"	14.027	15.757	15.757	9 1/2
9 3/4	0.028	2.558	4.183	8.060	8.752	9.206	10.020	10.826	11.658	12.510	13.417	14.403	15.516	18.150	"	"	14.035	15.752	15.752	9 3/4
FP	2.430	5.227	7.927	10.627	13.327	16.027	18.727	21.427	24.127	26.827	29.527	32.227	34.927	37.627	9.000	9.000	14.043	15.767	15.767	FP
X	11.688	11.958	12.228	12.498	12.768	13.038	13.308	13.578	13.848	14.118	14.388	14.658	14.928	15.198	15.198	15.198	15.198	15.198	15.198	X
RAND(C)	6.50	6.57	6.63	6.69	6.74	6.86	6.96	7.08	7.23	7.45	7.75	8.23	9.16	12.27	10.00	10.00	15.20	15.30	16.25	RAND(C)
10.100(C)	6.50	6.57	6.66	6.74	6.84	7.05	7.30	7.72	8.60	9.60	10.60	11.60	12.60	13.60	10.00	10.00	15.20	15.30	16.25	10.100(C)

Fig. 14 Offset of ro-ro ferry Sewol

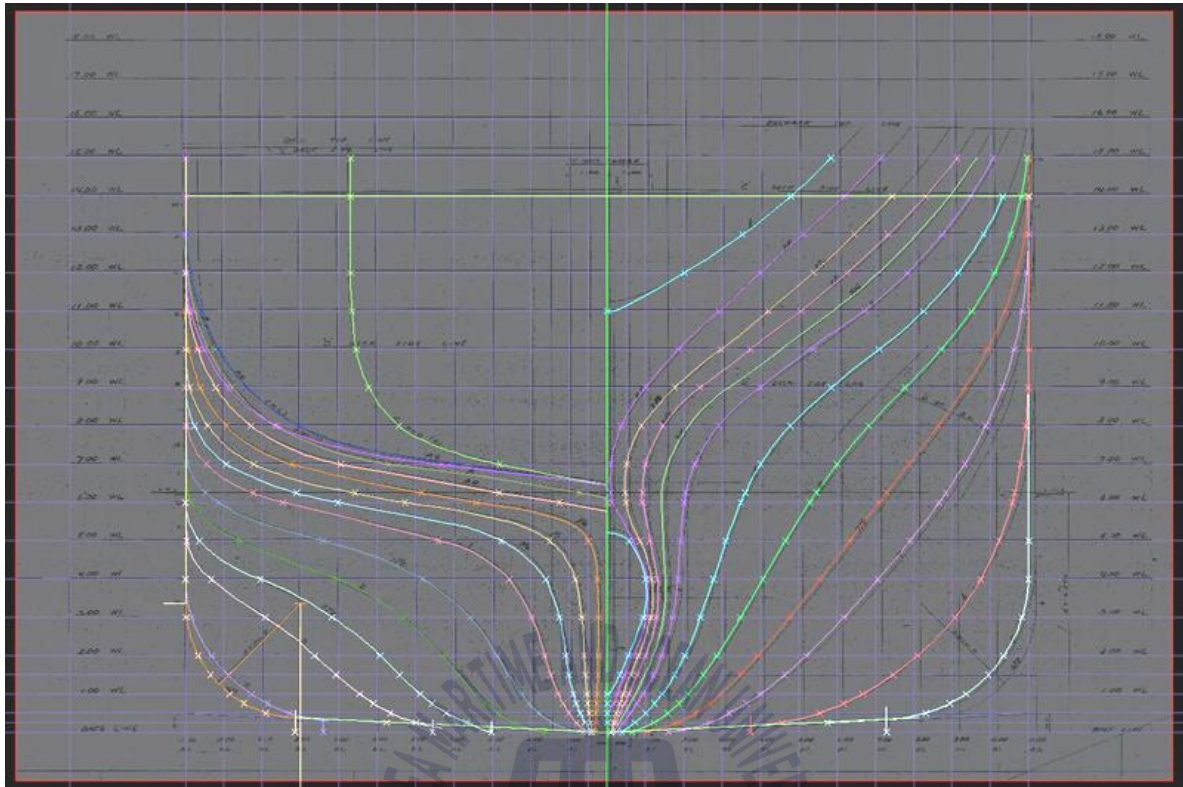


Fig. 15 Lines of ro-ro ferry Sewol on Auto Cad

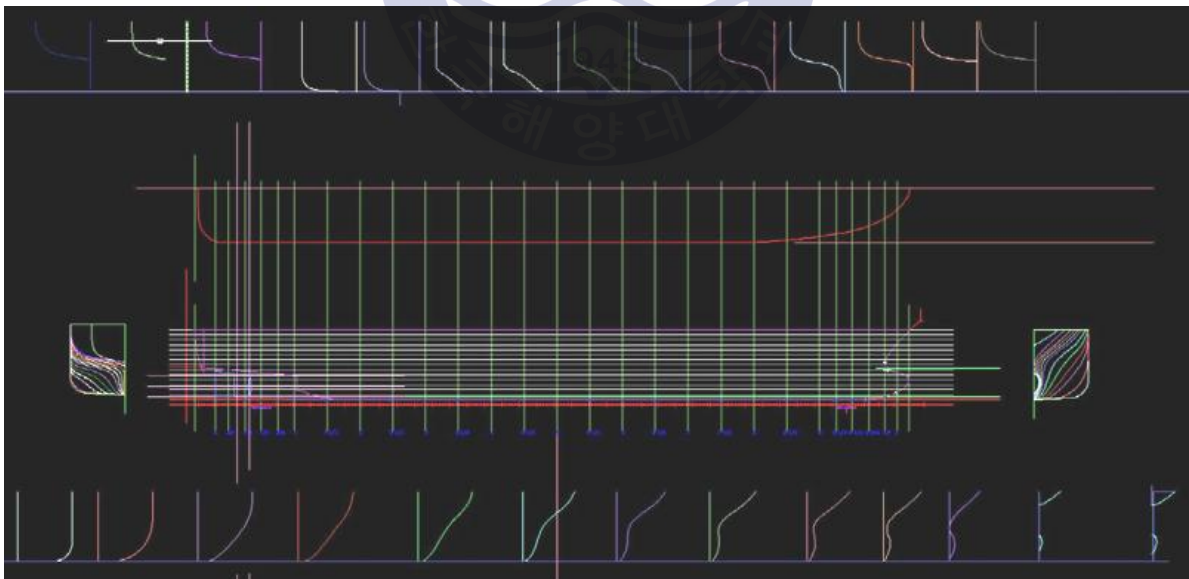


Fig. 16 Lines output of ro-ro ferry Sewol on Auto Cad

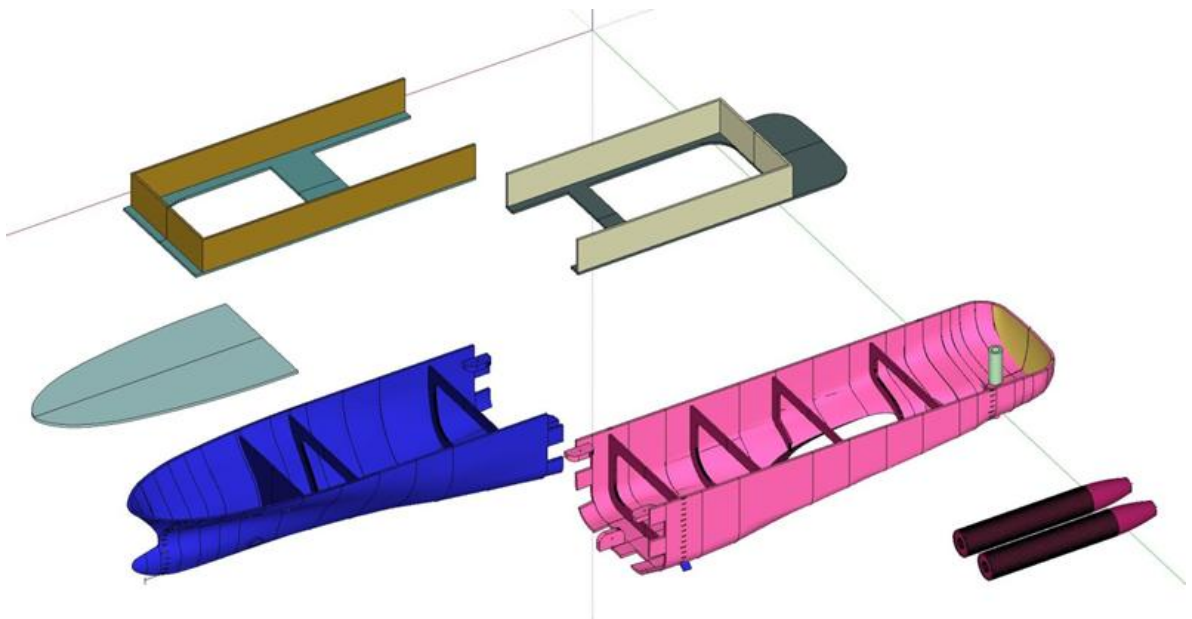
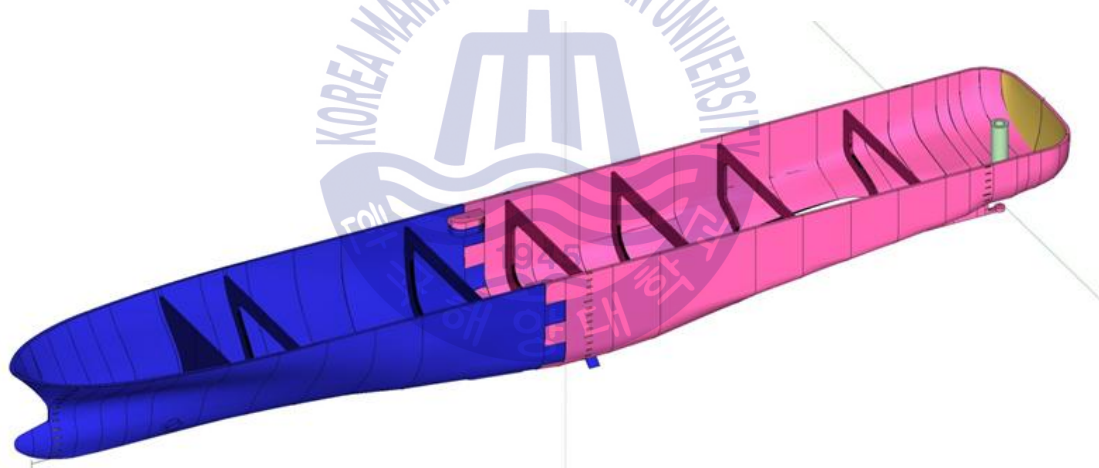
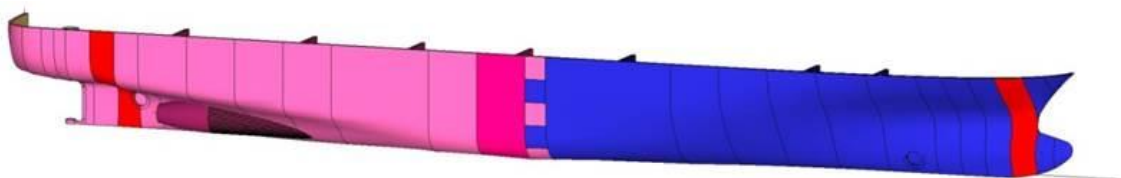


Fig. 17 Parts of 3D hull modeling



(a) iso view



(b) side view

Fig. 18 Assembly of 3D hull modeling



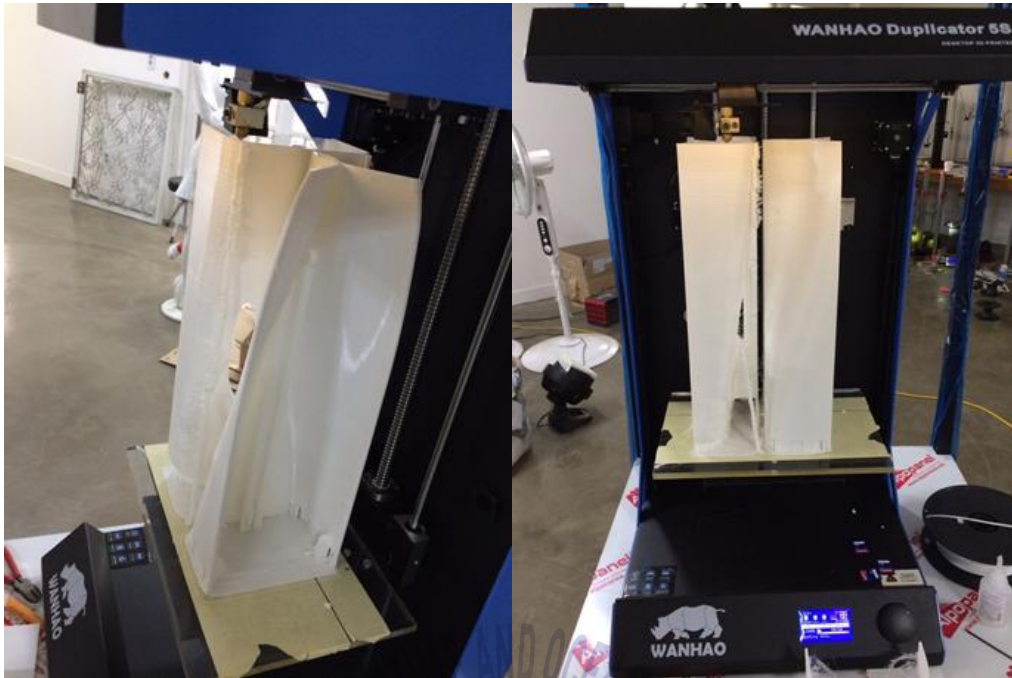


Fig. 19 Two parts of model ship using 3D printer



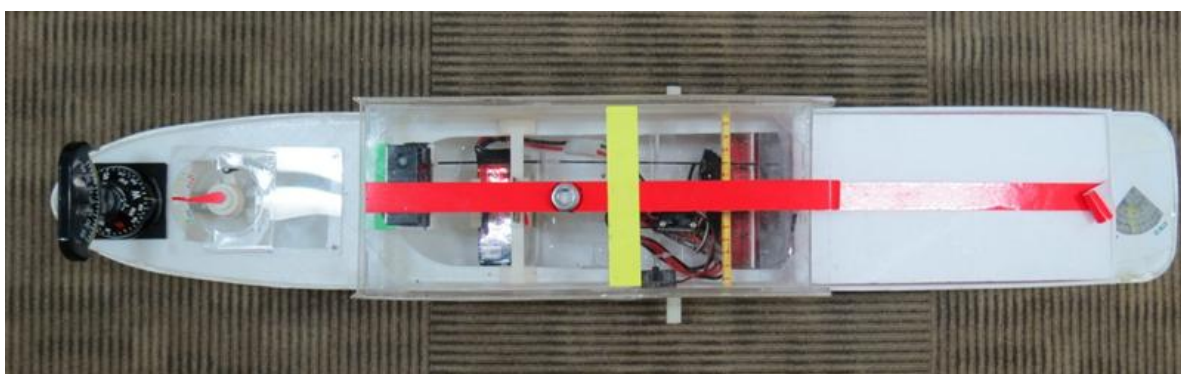
(a) iso view



(b) fore & aft view



(c) side view



(d) top view

Fig. 20 General view of model ship



## 4.2 모형선의 중량 조정, 추진, 원격조종 및 측량 장치

모형선 제작 시 각 부품 및 선체의 무게를 Fig. 21에서와 같이 미세중량 측정저울(micro scale)로 측정하여 사고선박의 사고 시의 총 배수량(9,907.3ton)에 상응하는 모형선의 배수량(2.94kg)을 확인하였다. 모형선의 속도를 제어하는 전·후진 추진장치와 다양한 타각을 사용할 수 있는 무선 리모콘을 Fig. 22에서와 같이 사용하여 실제 선박과 같이 실시간 원격으로 조종할 수 있도록 하였다.

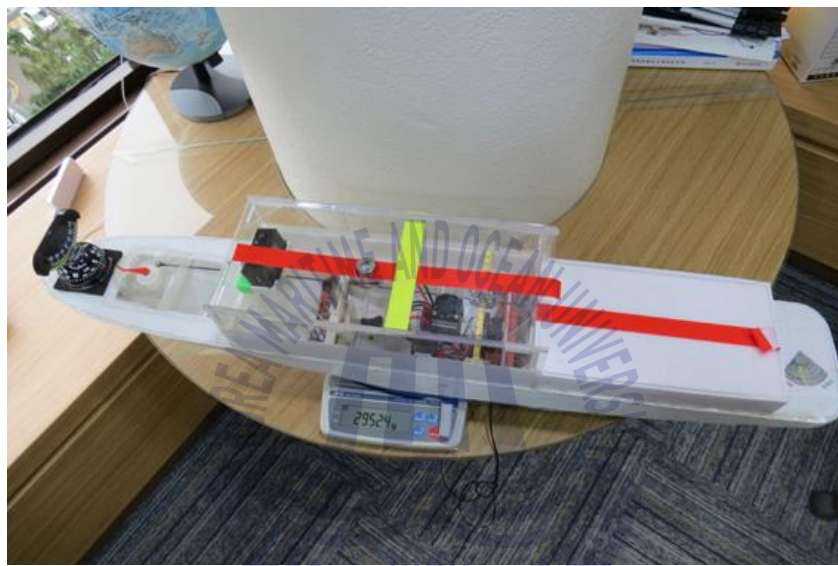


Fig. 21 Measurement of displacement weight of model ship



Fig. 22 General view of model ship and remote controller

모형선의 선수에 Fig. 23에서와 같이 아날로그 경사계(analogue clinometer), 자기 나침반(magnetic compass)과 타각 지시계(rudder angle indicator) 등의 측정장치와 Fig. 24의 액션 캠코더(action camcorder)를 설치하였다. 선회시험 시 매 순간의 모형선의 횡경사, 타각 지시계와 자기 나침반에 의한 선수방위 값을 동시에 초소형 액션 캠코더를 사용하여 동 시간에 앞의 3가지 측정 값을 연속적으로 측정 및 기록할 수 있도록 하였다.

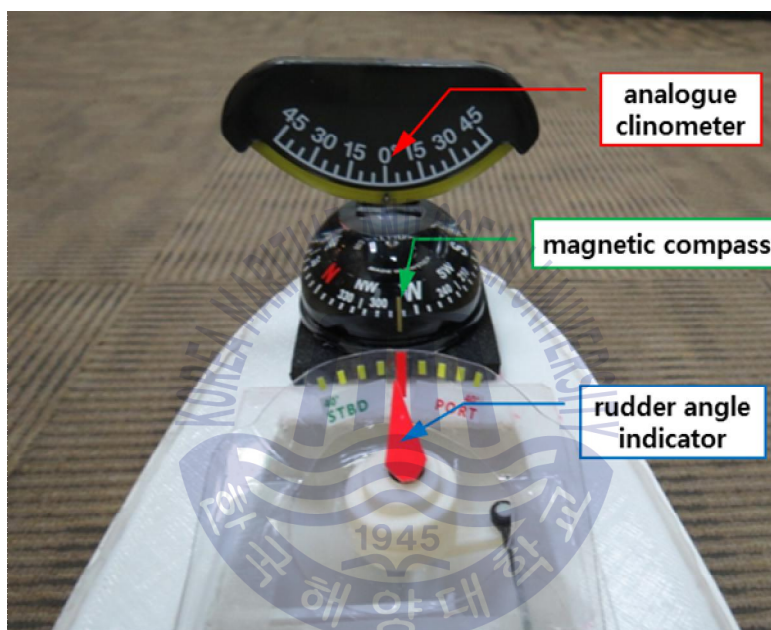


Fig. 23 Measuring devices at model ship' s bow

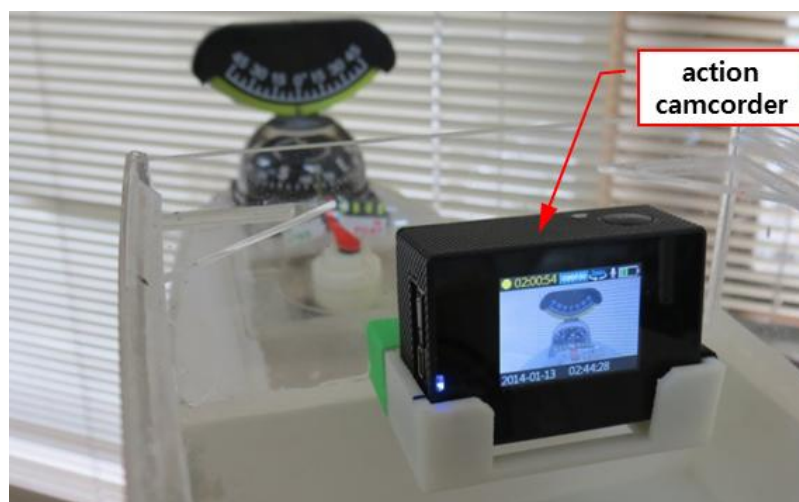


Fig. 24 Action camcorder at model ship' s midship

### 4.3 Froude 수에 의한 모형선의 선속 결정

Froude 수( $Fn$ )는 자유표면 흐름에서의 자유 표면파의 유속과 속도 사이의 비율의 제곱(the square of the ratio between the flow velocity and the velocity of the a free surface wave in a free surface flow)을 의미한다. 즉, 실선과 모형선이 같은 조건에서 선회시험을 수행할 수 있도록 하는 것이 바로 Froude 수로서  $Fn = v/(gL)^{0.5}$ 의 산출 공식을 사용하였다. 여기서  $v$ 는 선속(m/s),  $g$ 는 중력 가속도( $m/s^2$ ),  $L$ 은 선박의 수선 간 길이(m)이다.

사고선박의 사고 직전의 선속( $v_s$ )이 18.5노트(약 9.51722m/s)이고, 수선 간 길이( $L_s$ )는 132.0m 이므로 Froude 수는 0.26452이다. 모형선의 수선 간 길이( $L_m$ )는 0.88m이고 같은 Froude 수에서의 모형선의 선속( $v_m$ )은 0.77708m/s가 된다. 사고 선박의 실선과 모형선의 대응속도 관계식  $v_s/(L_s)^{0.5} = v_m/(L_m)^{0.5}$  으로부터 구한 모형선의 선속도 0.77708m로 추정된다.

기하학적으로 상사인 실선과 모형선, 즉 Froude 수가 동일한 경우 두 선속은 실선과 모형선의 길이 치수의 제곱근에 비례하면 잉여저항은 길이 치수의 세제곱에 비례한다는 Froude 비교법칙에 의하면 모형선의 대응선속은 실선의 선속을 모형선 선속의 축척의 제곱근에 반비례하게 된다는 것과 같은 의미이다. 본 모형선 선회시험의 선속은 0.78m로 설정하였다.

### 4.4 모형선의 선회시험 장소 및 GM 추정

모형선의 선회시험은 한국해양수산연구원 용당 캠퍼스 ROV 실험실의 실내수조에서 2015년 7월 10일에 실시하였다. 야외 수조에서는 바람의 영향을 쉽게 받을 수 있고 선박의 움직임을 도식화하기 위한 소형 GPS와 같은 장비를 사용하기에는 모형선의 전장이 1.0m 정도로 충분히 크지 않고 선회경도 다소 작을 뿐 아니라 선회경이 다소 작아 GPS 수신기의 출력자료에 근거한다 하더라도 모형선의 정확한 거동을 수치화하는 데에는 정확도의 한계가 있어 실내수조에서 Video 영상을 사용하여 수치화 하였다.

본 선회시험에서는 GM의 변화에 따른 선회경과 횡경사의 경향을 파악함이



목적이므로, 실선의 GM에 상응하는 GM을 모형선에 적용하기 위해서는 모형선에서 GM을 원하는 수치만큼 조정하는 장치가 필요하다. 이를 위하여, Fig. 25에서와 같이 선박의 경사시험을 위해 이동용 무게 추와 이동장치를 설치하였고, GM을 변경할 수 있게 하기 위한 모형선의 수직 무게중심(VCG) 위치 조정 장치를 설치하였다.

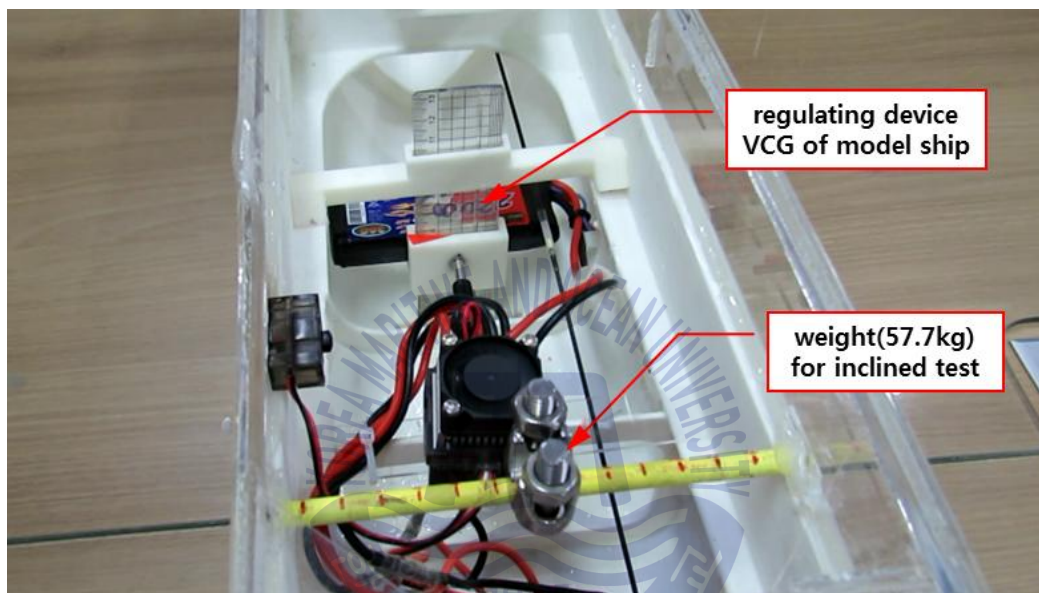


Fig. 25 View of list test weight and vertical weight adjuster

Fig. 26은 경사시험에 적용된 원리와 수식을 보여주고 있다. Fig. 25에서와 같이 모형선에 57.7g의 중량을 11.0cm 만큼 정횡으로 이동하였을 경우의 경사는 같은 조건에서의 실선에서 194.77톤(모형선에서의 중량 57.7g에 상응)의 중량을 정횡으로 16.5m(모형선의 11cm에 상응) 이동하는 경우와 같다. 사고선박의 실선 경사시험 시의 각 GM 90cm, 60cm, 30cm 및 20cm에 상응한 모형선 GM을 추정하기 위하여 각 GM에 대한 실선의 횡경사를 Fig. 26의 경사시험 수식에 따라 구하고 모형선에도 같은 경사각을 주어 모형선의 GM이 각각 0.604cm, 0.407cm, 0.202cm 및 0.135cm가 되도록 모형선의 수직 무게중심 조정 장치를 변경하여 경사시험을 수행하였다.

$$KG = KM - GM$$

$$GG' = w \times d / \text{Disp.}$$

$$GG' = GM \times \tan \theta$$

$$\tan \theta = a/l$$

$$GM = w \times d / (\text{disp} \times \tan \theta)$$

$$GM = (w \times d / \text{disp}) \times (l/a)$$

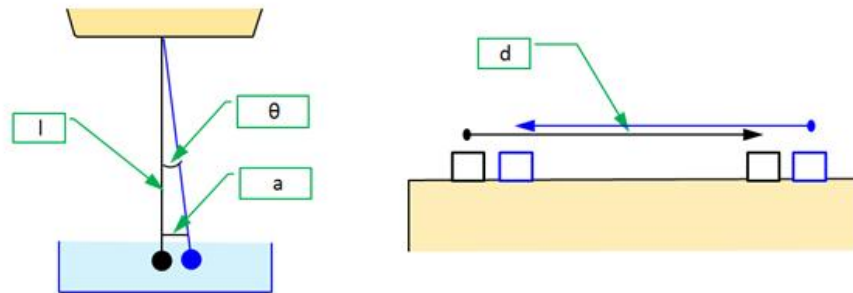


Fig. 26 Principle of heeling test

사고선박의 출항 당시의 만재흘수 상태를 기준으로 한 배수량은 Fig. 27의 복원성 계산서에서와 같이 9,907.3톤으로 설정하였고, 이에 상응한 모형선의 배수량은 2.9355 kg이다. 실선의 GM이 90cm일 경우 Fig. 26의 GM 계산식  $GM = w \times d / (\text{displacement} \times \tan \theta)$ 을 사용하면 경사각은  $19.7^\circ$ 가 된다. 여기서  $w$ 와  $d$ 는 각각 실선과 모형선의 경사시험 용 중량물의 무게와 정형 이동량을 의미한다. 따라서 모형선의 경사시험에서도 횡경사가  $19.7^\circ$ 가 되도록 수직 무게중심 조정장치를 이용하여 조정하였다. 각 GM에 따른 경사각은  $19.7^\circ$ ,  $28.5^\circ$ ,  $47.5^\circ$  및  $58.0^\circ$ 이었다.

DRAFT (M)	DISP MLD(M3)	DISP EXT(T)	VCB (M)	LCB (M)	LCF (M)	TKM (M)	MTC (T-M)	TPC (TON)	WSA (M2)	CB	CW	CP	CM
6.35	9817.7	10105.4	3.632	-4.583	-10.227	11.057	166.0	22.7	3207.3	0.5336	0.7609	0.5696	0.9368
6.36	9840.1	10128.5	3.638	-4.597	-10.269	11.058	166.5	22.7	3212.0	0.5340	0.7619	0.5699	0.9369
6.37	9862.5	10151.5	3.645	-4.611	-10.311	11.060	167.1	22.8	3216.7	0.5343	0.7628	0.5702	0.9370
6.38	9884.9	10174.5	3.651	-4.625	-10.353	11.061	167.6	22.8	3221.4	0.5347	0.7637	0.5706	0.9371
6.39	<u>9907.3</u>	10197.5	3.657	-4.639	-10.395	11.062	168.1	22.8	3226.1	0.5351	0.7646	0.5709	0.9372

Fig. 27 Hydrostatic characteristics of Sewol at departing deadweight state

## 4.5 모형선의 선회시험

사고선박의 모형선 선회시험은 실선의 급선회 사고 직전의 Froude 수와 같은 선속 0.78m/s로 모형선이 우현 전타각  $35^\circ$  를 사용하여 항주하는 경우 실선의 각 GM 90cm, 60cm, 30cm 및 20cm에 대하여 수행하였으며, 각 경우에 대한 선회시험의 선회경과 사고선박의 AIS 항적과의 비교 검토와 외방경사와의 관계를 추정하여 사고선박의 급선회 시의 사고선박의 선회특성을 추론하고자 하였다.

### 4.5.1 실선 GM 90cm인 경우

Fig. 28은 실선 GM 90cm인 경우의 모형선 선회시험을 수행하는 장면 중 최대 횡경사가 발생한 순간의 장면을 보여주고 있고, Fig. 29는 선회시험의 전체 선회궤적과 급선회 시의 AIS 항적을 비교해 보여주고 있다. 그리고 매 2초 경과 시의 선회시험의 결과를 정리하면 Table 2와 같다. 모형선의 선회시험에서 알 수 있듯이 실제 사고선박의 GM이 약 90cm 정도로 충분하다면, 우현  $35^\circ$  조타 시의 선회 시에도 선박의 좌현 외방경사는 약  $7^\circ$  정도라는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 선회궤적 역시 사고 당시 실제선박의 AIS 항적보다도 매우 크게 벗어나 선회한다는 것을 알 수 있었다. 사고선박의 시운전 시 우현  $35^\circ$  타각의 우회두 시운전 선회시험의 선회궤적에 비해서도 대체로 크게 벗어나서 선회하였고, 최대 횡경사는 Fig. 4a에서와 같이 약  $7.5^\circ$  로서 모형선 선회시험에서의 최대 횡경사보다 약간 크지만 비슷하였다. 시운전 시 정확한 GM은 알 수 없지만 선수미 흘수는 4.44m와 5.46m이었고 배수량은 약 7,220톤 이었다.





Fig. 28 Turning test of model ship at GM 90cm at maximum heeling angle

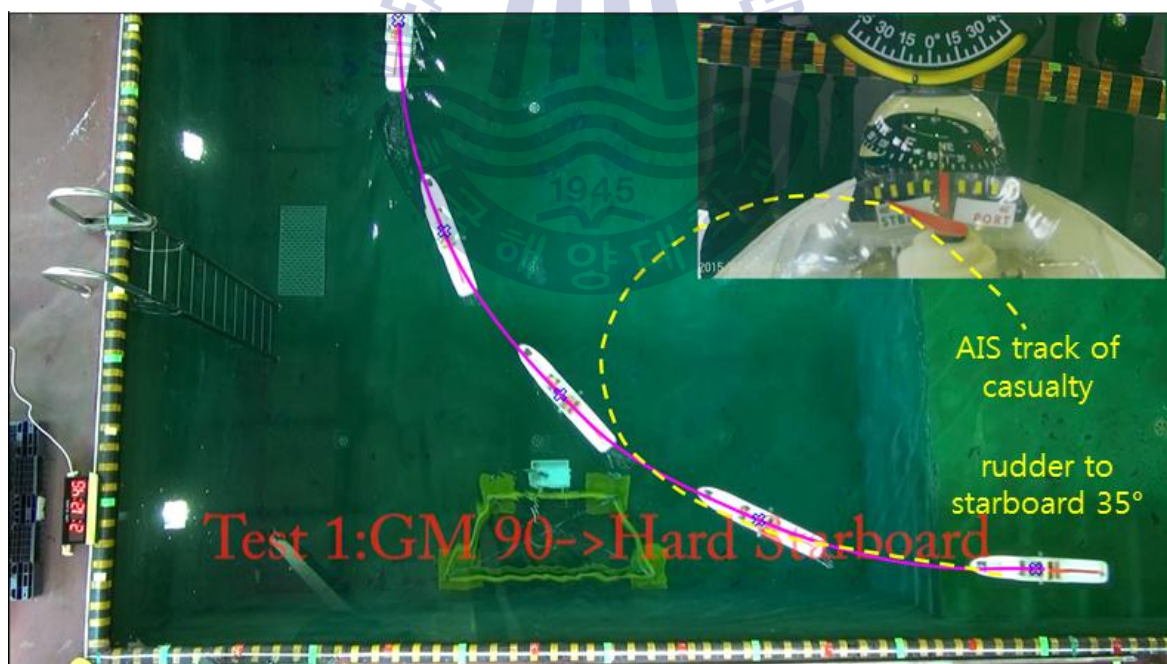


Fig. 29 Turning test of model ship at GM 90cm

Table 2 Result of turning test at GM 90cm

time	rudder angle	heading	heeling angle
14:12:37 (0)	midship	332	0
14:12:39 (2)	hard stb'd	329	port 1
14:12:41 (4)	hard stb'd	350	port 6
14:12:43 (6)	hard stb'd	015	port 7
14:12:45 (8)	hard stb'd	041	port 7
14:12:47 (10)	hard stb'd	069	port 7

#### 4.5.2 실선 GM 60cm인 경우

Fig. 30은 실선 GM 60cm인 경우의 모형선의 선회시험을 수행하는 장면이고 급선회 사고 시의 AIS 항적과 비교해 보여주고 있다. 그리고 매 2초 경과 시의 선회시험의 결과를 정리하면 Table 3과 같다. 모형선의 선회시험에서 알 수 있듯이 실제 사고선박의 GM이 약 60cm 정도에서 우현 35° 조타 시의 선회 시에도 선박의 좌현 최대 횡경사는 약 9° 정도라는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 선회궤도는 GM 90cm의 경우보다는 조금 안으로 들어오지만 여전히 사고선박의 급선회 사고 시의 AIS 항적보다는 크게 선회한다는 것을 알 수 있었다.

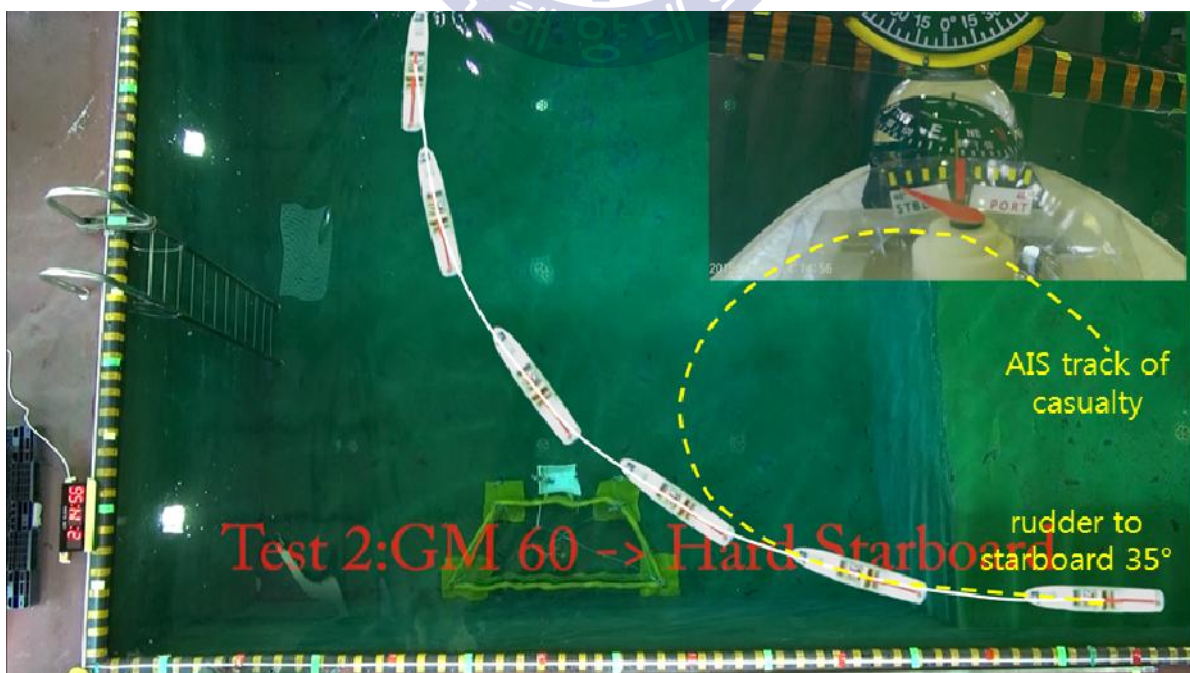


Fig. 30 Turning test of model ship at GM 60cm

Table 3 Result of turning test at GM 60cm

time	rudder angle	heading	heeling angle
14:14:46 (0)	midship	322	0
14:14:48 (2)	hard stb'd	335	0
14:14:50 (4)	hard stb'd	354	port 9
14:14:52 (6)	hard stb'd	021	port 8
14:14:54 (8)	hard stb'd	046	port 8
14:14:56 (10)	hard stb'd	053	port 9

#### 4.5.3 실선 GM 30cm인 경우

Fig. 31은 실선 GM 30cm인 경우의 모형선의 선회시험을 수행하는 장면 중 최대 횡경사가 발생한 순간의 장면을 보여주고 있고, 급선회 사고 시의 AIS 항적과 비교해 보여주고 있다. 그리고 매 2초 경과 시의 선회시험의 결과를 정리하면 Table 4와 같고, 시간에 따른 좌현 횡경사의 응답은 Fig. 32에 나타냈다. 모형선의 선회시험에서 알 수 있듯이 실선 GM이 30cm인 경우 우현 35° 조타 시의 급선회 시의 좌현 외방경사는 최대 약 29° 까지 현저하게 크게 횡경사졌고 약간 복원되어 약 23° 정도까지 복원되었다는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 선회경은 GM 90cm와 60cm의 경우보다 훨씬 작아졌지만 사고선박의 급선회 시의 AIS 항적보다는 다소 벗어났다는 것을 알 수 있다.



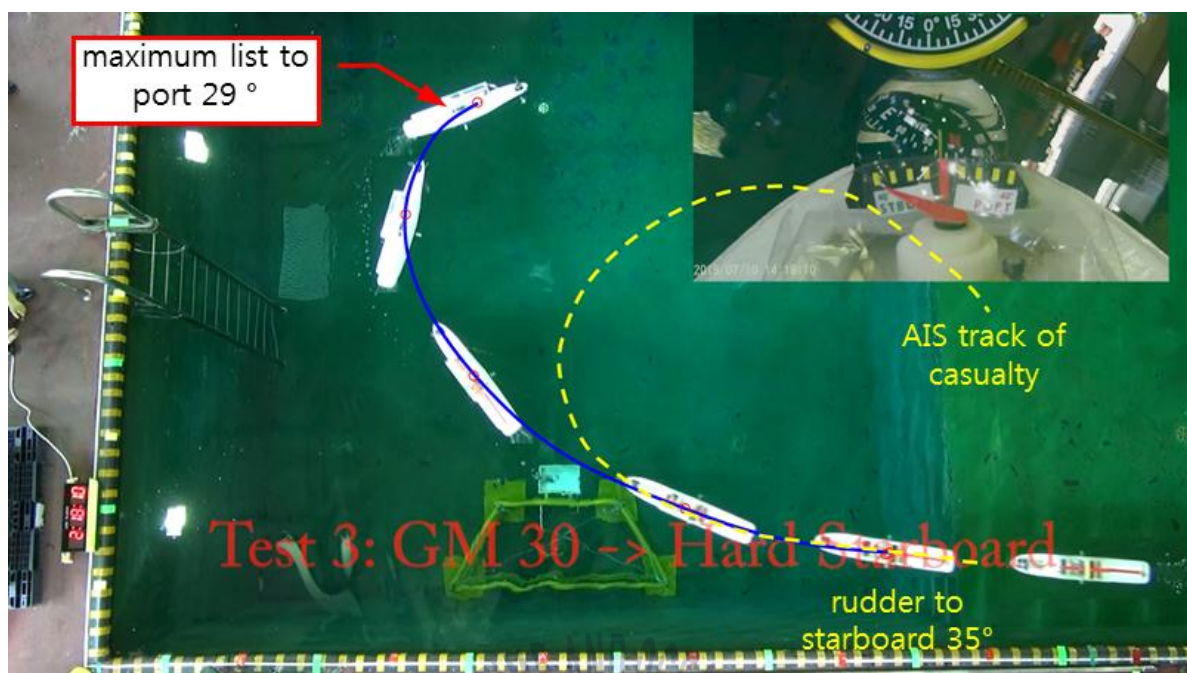


Fig. 31 Turning test of model ship at GM 30cm at maximum heeling angle

Table 4 Result of turning test at GM 30cm

time	rudder angle	heading	heeling angle
14:18:02 (0)	midship	326	0
14:18:04 (2)	hard stb'd	342	port 5
14:18:06 (4)	hard stb'd	012	port 11
14:18:08 (6)	hard stb'd	064	port 26
14:18:10 (8)	hard stb'd	124	port 29
14:18:12 (10)	hard stb'd	166	port 25
14:18:14 (12)	hard stb'd	211	port 23
14:18:16 (14)	hard stb'd	259	port 23
14:18:18 (16)	port 15°	292	port 22
14:18:20 (18)	port 15°	301	port 12

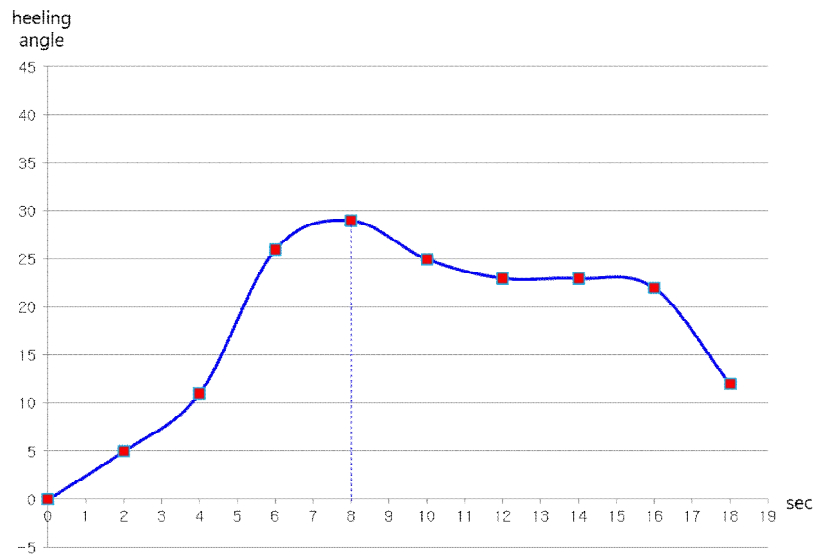


Fig. 32 Heeling angle response of model ship at GM 30cm

최대 횡경사가 발생한 후 모형선의 선회궤적은 더 이상 사고선박의 급선회 시의 AIS 항적과 달리 밖으로 벗어나지 않고 안으로 들어오는 것을 Fig. 33에서 확인할 수 있었다. 이것은 타가 우현 전타 상태를 계속 유지하고 있다면 GM 30cm일 경우 급선회 시 외방경사가 최대 횡경사가 29° 정도 발생하는 동안에는 실제 AIS 항적을 벗어났지만 이후에는 횡경사가 크게 감소하지 않고 약 23° 정도를 유지하면서 우회두가 계속되면서 원형으로 AIS 항적 안으로 들어오게 되는 것으로 사료된다. Fig. 34에서와 같이 세월호의 침몰 전과 인양 후의 타각은 각각 좌현 약 5°와 약 15° 정도로 되어 있음을 확인할 수 있다. GM 30cm의 선회시험의 경우 Fig. 35에서의 모형선 선회궤적의 위치에서 타를 좌현 15°를 사용하였으며, 그 후 횡경사각은 Table 4에서와 같이 점점 작아지면서 어느 정도 직진하고 있음을 알 수 있었다.

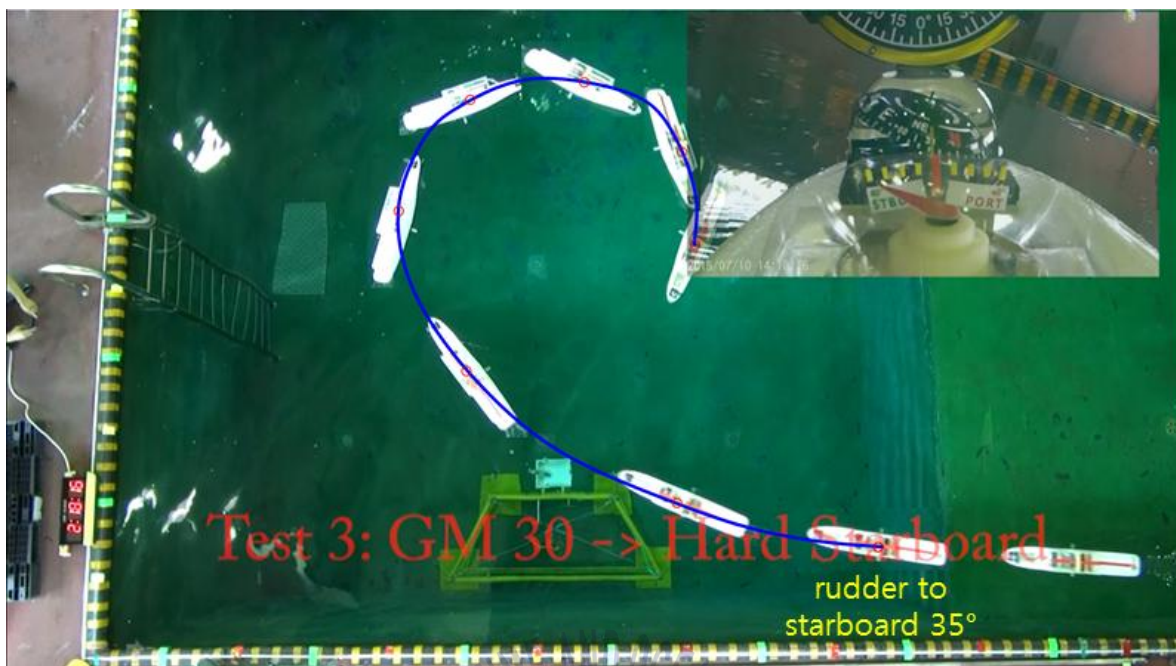
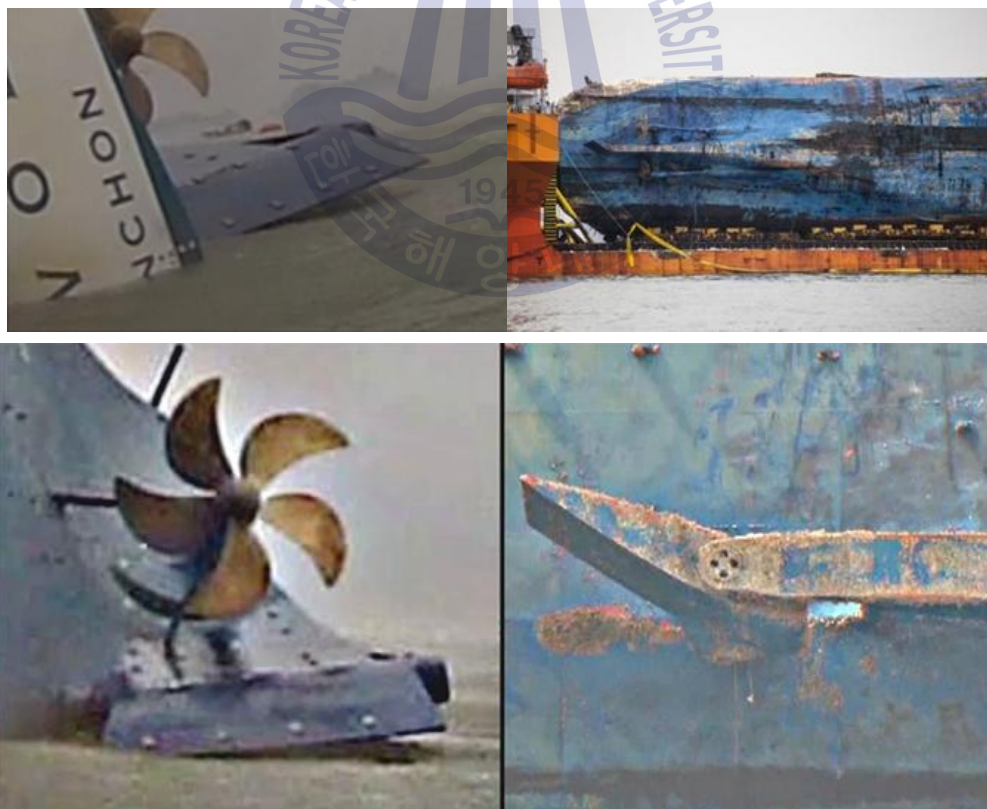


Fig. 33 Turning test of model ship at GM 30cm before rudder to port 15°



(a) before sinking

(b) after salvage

Fig. 34 Rudder turning state before sinking and after salvage



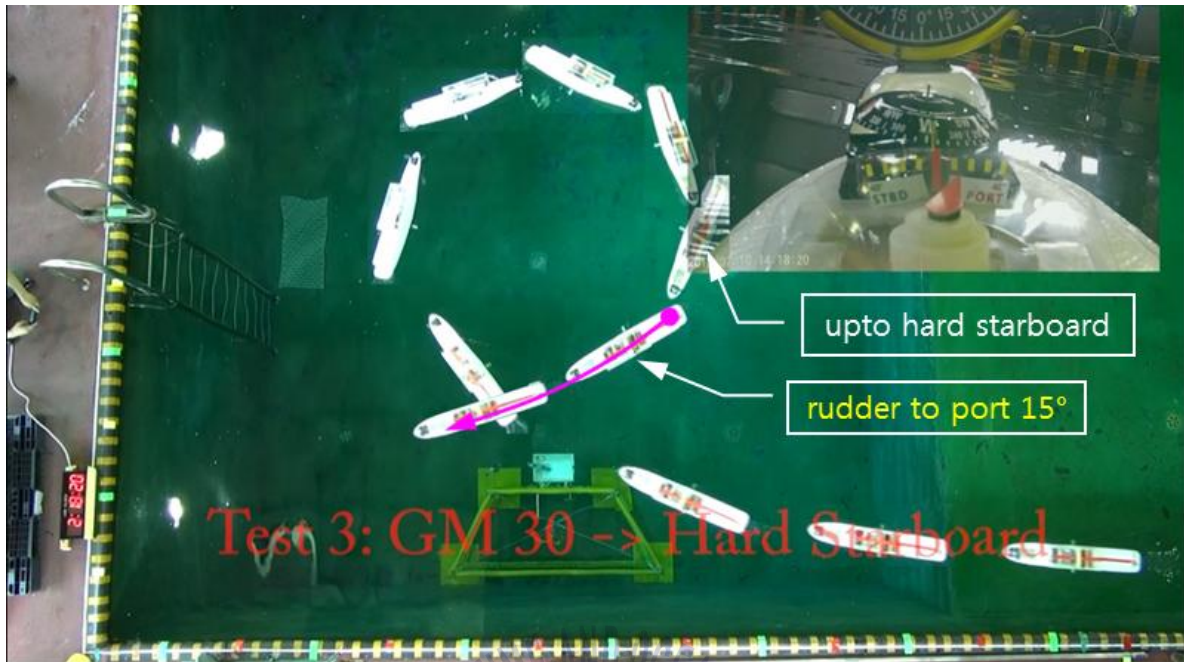


Fig. 35 Turning test of model ship at GM 30cm after rudder to port 15°

#### 4.5.4 실선 GM 20cm인 경우

Fig. 36은 실선 GM 20cm인 경우의 모형선의 선회시험을 수행하는 장면 중 우현 35° 전타를 실시하기 직전에 계측된 선박의 경사가 우현 약 2° 인 것을 보여주고 있고, Fig. 37은 초기 횡경사가 우현 2도로 경사진 것을 감안하여 최대 횡경사가 우현 37° 발생한 순간의 장면을 보여주고 있다. Figs. 38과 39는 각각 최대 횡경사가 발생한 후 횡경사가 32도로 감소하였고 좌현 15° 로 타각을 변화시키기 직전의 상태와 좌현 15° 로 타각을 변화시킨 후의 횡경사와 선회궤적을 사고선박의 급선회 사고 시의 AIS 항적과 비교해 보여주고 있다. 그리고 매 2초 경과 시의 선회시험의 결과를 정리하면 Table 5와 같고, 좌현 횡경사의 응답은 GM 30cm인 경우와 비교하여 Fig. 40에 보여주고 있다.

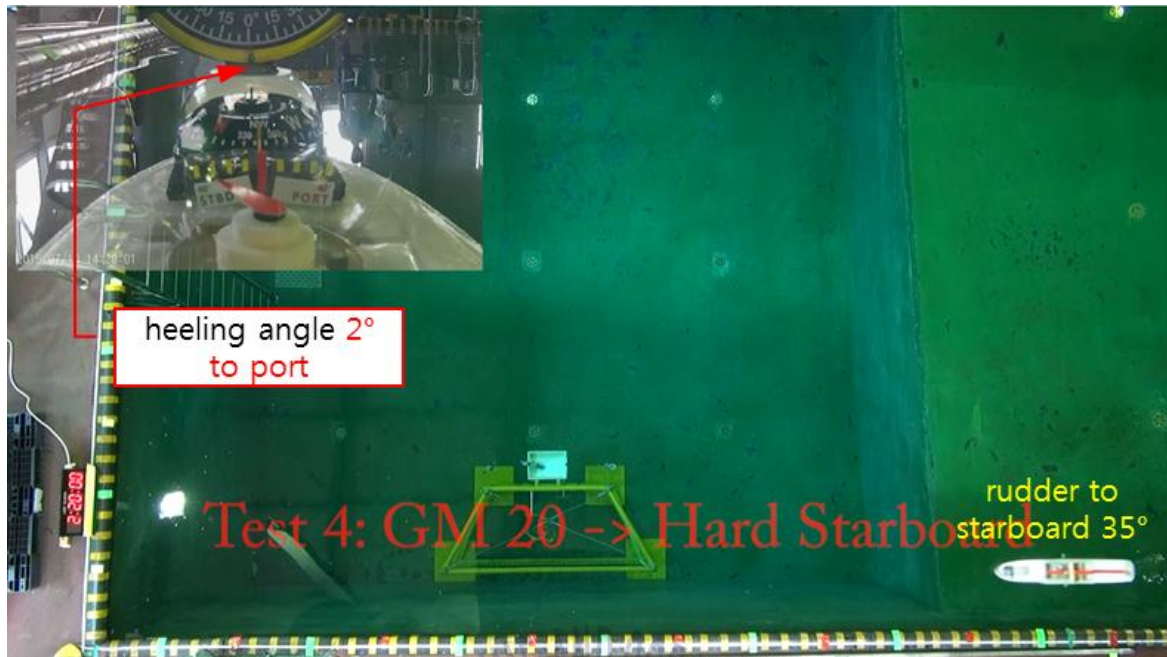


Fig. 36 Turning test of model ship at GM 20cm at starting time

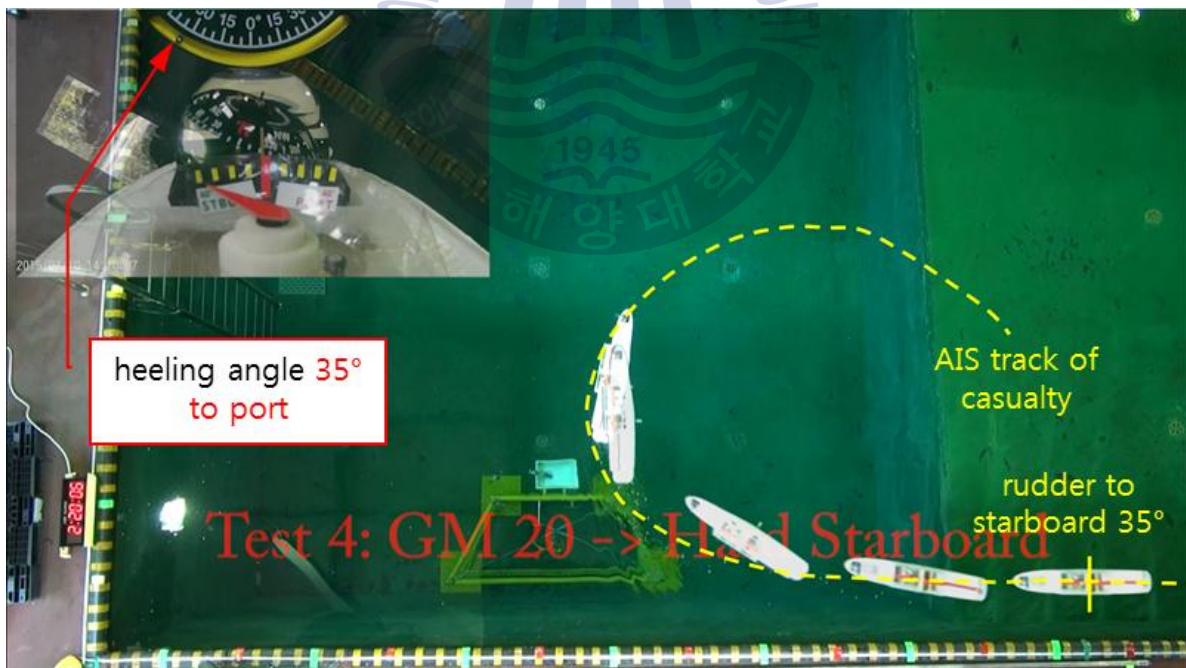


Fig. 37 Turning test of model ship at GM 20cm at maximum heeling angle



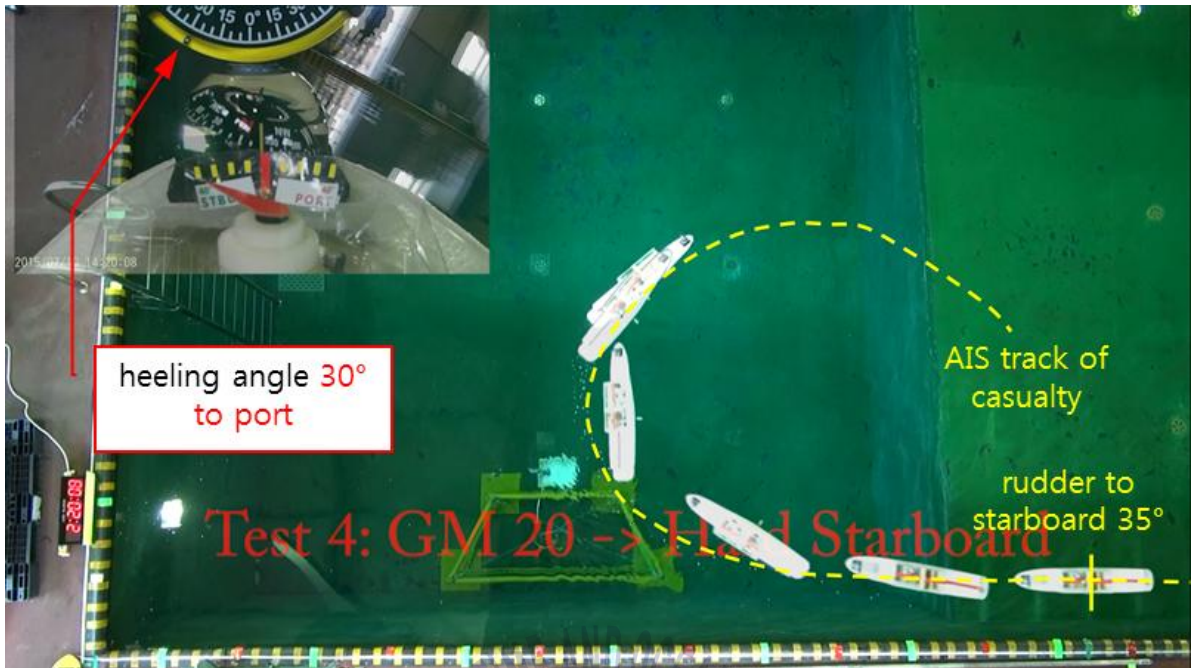


Fig. 38 Turning test of model ship at GM 20cm right before rudder 15 degrees to port

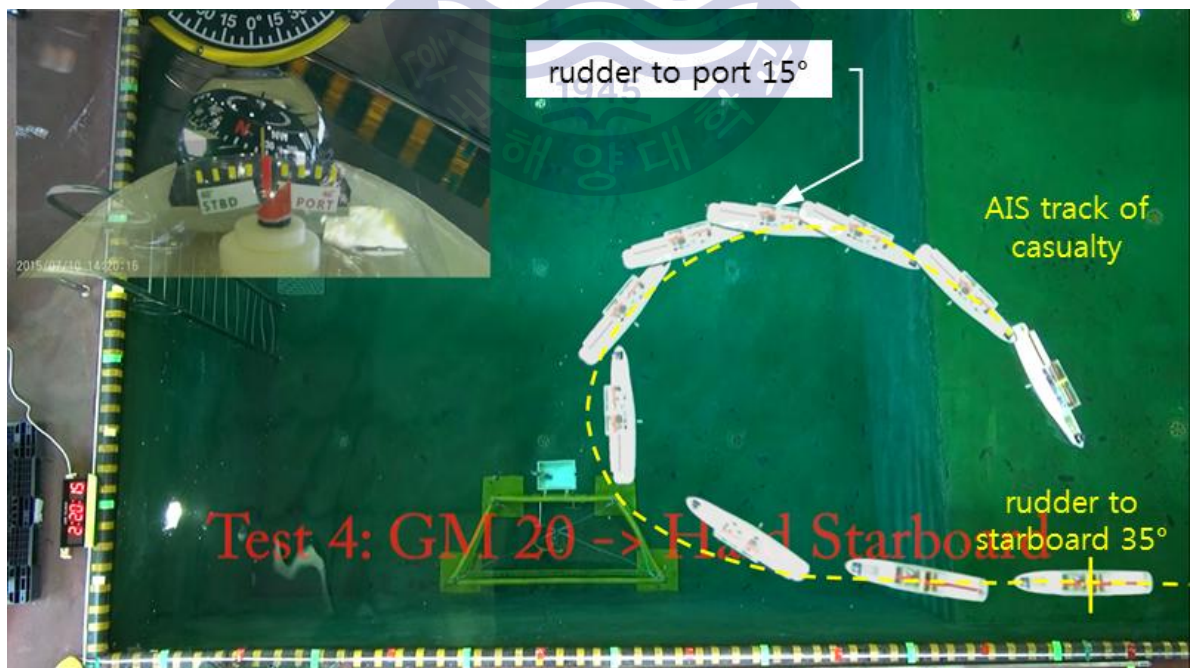


Fig. 39 Turning test of model ship at GM 20cm after rudder 15 degrees to port



Table 5 Result of turning test at GM 20cm

time	rudder angle	heading	heeling angle
14:20:00 (0)	midship	320	stb'd 2
14:20:02 (2)	hard stb'd	329	port 5
14:20:04 (4)	hard stb'd	001	port 26
14:20:06 (6)	hard stb'd	060	port 36
14:20:08 (8)	hard stb'd	109	port 30
14:20:10 (10)	port 15	145	port 30
14:20:12 (12)	port 15	167	port 24
14:20:14 (14)	port 15	188	port 24
14:20:16 (16)	port 15	208	port 24
14:20:18 (18)	port 15	228	port 24

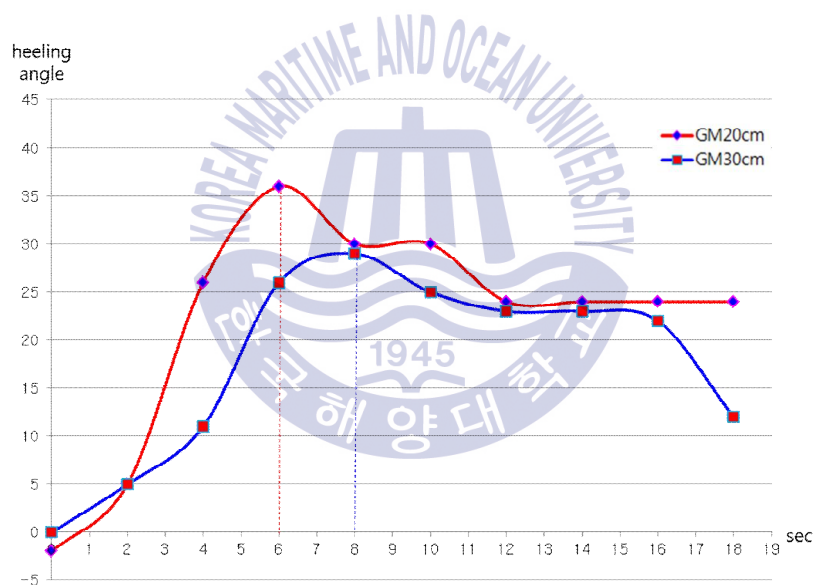


Fig. 40 Comparison of heeling angle responses of model ship between GM 20cm and 30cm

모형선의 선회시험에서 알 수 있듯이 실선 GM이 약 20cm인 경우 우현 35° 조타 시의 선회 시 선박의 좌현 외방경사는 최대 약 37도까지 현저하게 크게 경사졌고, Fig. 40에서의 GM 30cm와 20cm 의 횡경사의 응답의 비교에서 알 수 있듯이 GM 20cm일 경우에는 최대 횡경사가 훨씬 더 크게 나타났고 시간적으로도 앞서 발생하였다. 최대 횡경사가 발생하기까지의 모형선의 선회궤적은 실

제 사고 당시의 AIS 항적에 대체적으로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

GM 30cm의 경우와는 달리 Fig. 40에서와 같이 최대 횡경사가 발생하고 난 뒤 모형선의 우선회 궤적이 AIS 항적 안으로 들어오기 전에 타각을 좌현 15°로 사용하면서 선회궤적이 사고선박의 급선회 시의 AIS 항적과 대체로 잘 일치하고 있다는 것을 확인할 수 있다.

Table 5와 Fig. 40에서 알 수 있듯이 타각을 좌현 15°를 적용한 후에도 선박의 횡경사는 좌현 24° 정도를 유지하고 있었고, 2초당 22도 및 19도 정도로 초당 평균 각속도 10.25° 정도로 빠르게 선회하고 있었다. 실선의 GM 30cm인 경우에는 Table 4와 Fig. 40에서와 같이 타각을 좌현 15도 적용하기 전에는 평균 각속도 22.5°로 GM 20cm의 경우 타각을 좌현 15°로 적용한 후 보다 약 2배 이상으로 계속 빠르게 우선회하고 있었음을 알 수 있다. 이러한 상황에서 GM 30cm인 경우 타각을 좌현 15° 적용한 후 바로 다음 단계에서는 평균 각속도는 초당 4.5°로 급속하게 감속하였으며 횡경사도 12도° 정도로 급격히 복원하였음을 알 수 있었다.

본 선회시험을 통하여 GM의 추정뿐 만 아니라 최대 횡경사가 발생한 후 타각을 중립 또는 반대방향으로 타각을 변경하여 적용하는 시각도 선회성능에 미치는 영향을 분석하는데 매우 중요하다는 것을 확인할 수 있었다. 여기에다 초기 타각이 선회성능에 미치는 영향을 분석하기 위하여 우현 전타 35° 대신에 15°를 적용한 선회시험을 수행하였다.

Figs. 41 및 42는 실선 GM 20cm인 경우 우현 15° 조타한 모형선의 선회시험을 수행하는 장면 중 각각 최대 횡경사가 발생한 순간의 장면과 계속 타각을 유지한 경우 그 후의 선회궤적과 사고선박의 급선회 사고 시의 AIS 항적과 비교해 보여주고 있다. 그리고 매 2초 경과 시의 선회시험의 결과를 타각 우현 35°와 비교하여 정리하면 Table 6과 같고 Fig. 43에 나타내었다.

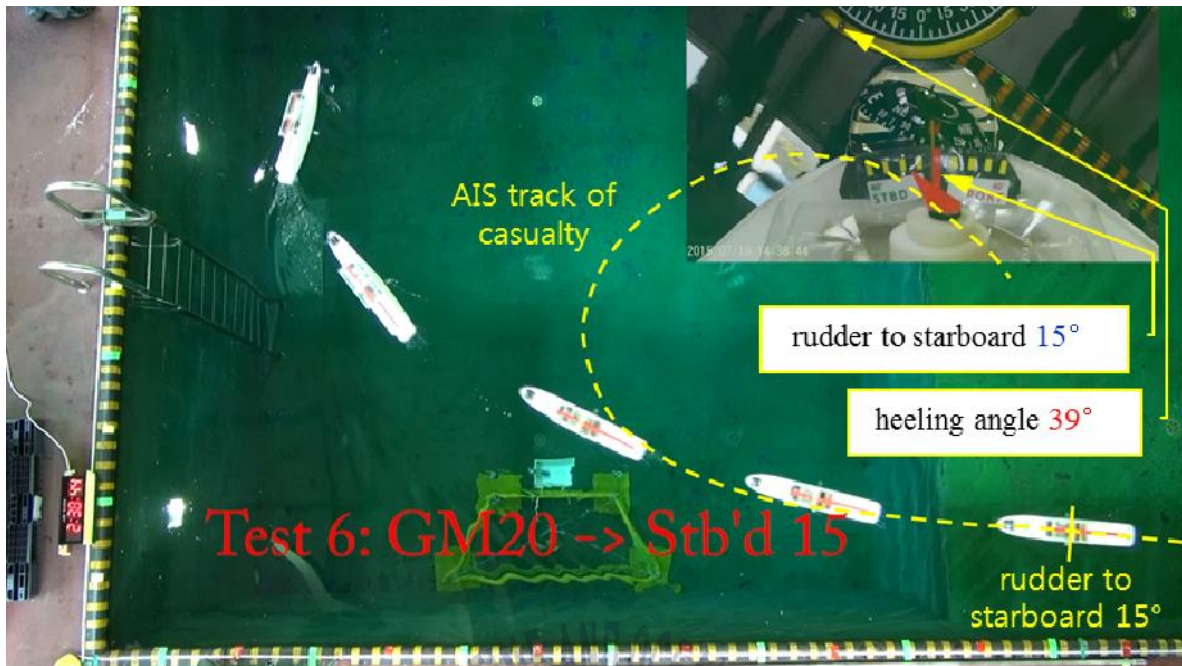


Fig. 41 Turning test of model ship at GM 20cm at maximum heeling angle with rudder angle of  $15^\circ$  to starboard

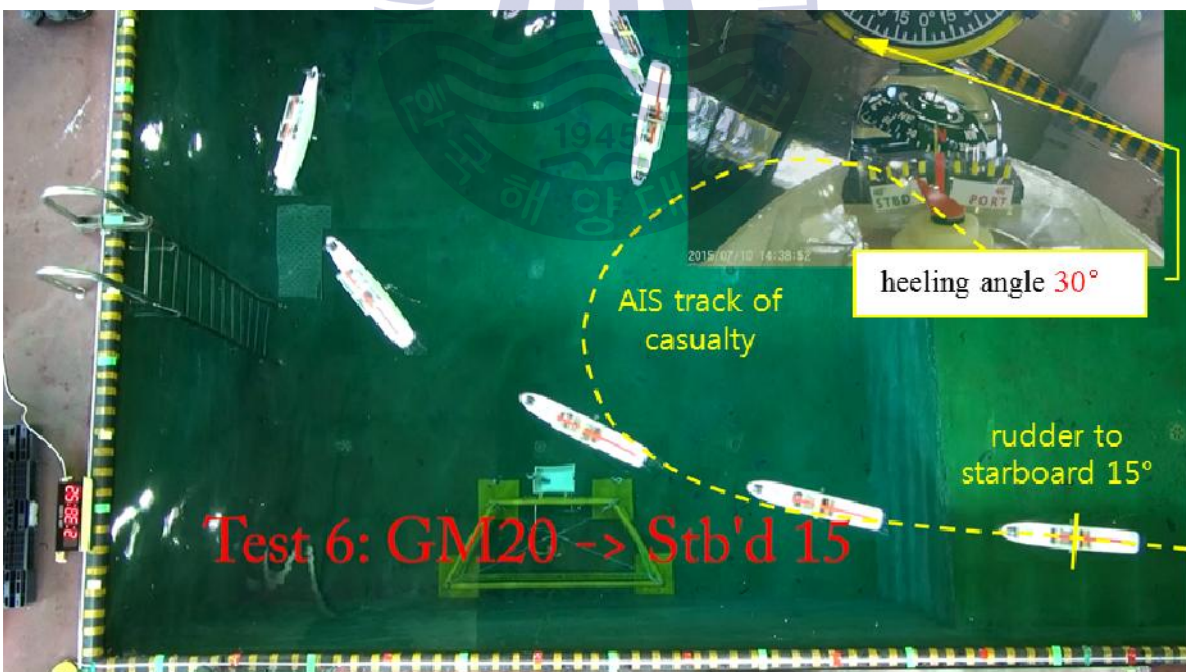
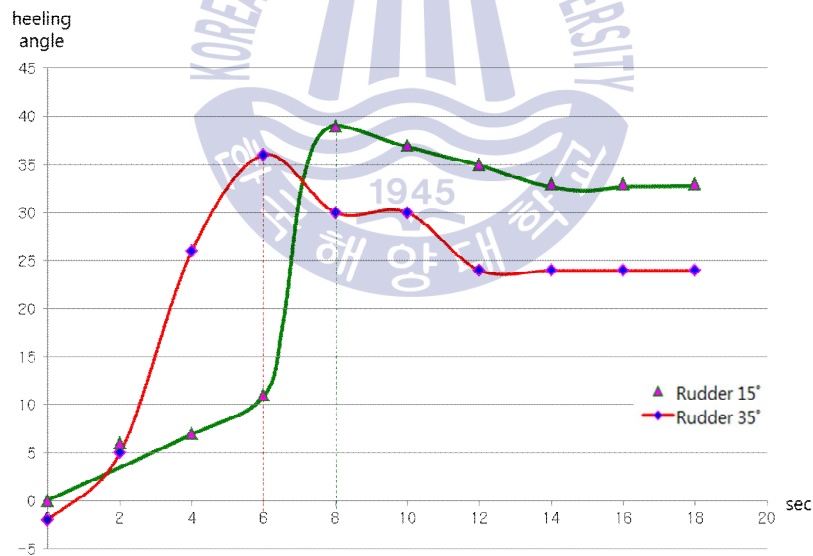


Fig. 42 Turning test of model ship at GM 20cm with continuous rudder angle of  $15^\circ$  to starboard

**Table 6** Comparison of results of turning test at GM 20cm at ruder angle of 35° and 15°

starboard 35°				starboard 15°			
time	rudder angle	heading	heeling angle	time	rudder angle	heading	heeling angle
14:20:00(0)	midship	320	stb'd 2	14:38:36(0)	midship	322	0
14:20:02(2)	hard stb'd	329	port 5	14:38:38(2)	hard stb'd	334	port 6
14:20:04(4)	hard stb'd	001	port 26	14:38:40(4)	hard stb'd	344	port 7
14:20:06(6)	hard stb'd	060	port 35	14:38:42(6)	hard stb'd	010	port 11
14:20:08(8)	hard stb'd	109	port 30	14:38:44(8)	hard stb'd	061	port 39
14:20:10(10)	port 15	145	port 30	14:38:46(10)	hard stb'd	115	port 37
14:20:12(12)	port 15	167	port 24	14:38:48(12)	hard stb'd	158	port 35
14:20:14(14)	port 15	188	port 24	14:38:50(14)	hard stb'd	200	port 33
14:20:16(16)	port 15	208	port 24	14:38:52(16)	hard stb'd	238	port 33
14:20:18(18)	port 15	228	port 24	14:38:54(18)	hard stb'd	274	port 33



**Fig. 43** Comparison of heeling angle of model ship between rudder angle 35° and 15° under GM 20cm

모형선의 우현 15° 조타 시의 선회시험에서 알 수 있듯이 우현 35° 조타 시의 선회 시 좌현 외방경사의 최대 경사각도 37° 보다 약간 더 크게 39° 정도 발생하였지만 발생시각은 2초 정도 뒤에 발생하였다. 이는 같은 GM에서는 작



은 타각을 사용하더라도 선박의 외방경사 시의 최대 횡경사는 큰 차이가 없거나 약간 더 클 수 있다는 것을 확인할 수 있었고, 최대 횡경사 발생 후 외방경사 각도는 크게 줄어들지 않았으며, 우현 타각  $15^\circ$  를 계속 유지하면서 최대 횡경사가 발생한 시각보다 8초 후에도 Fig. 42에서와 같이 횡경사가 약  $30^\circ$  정도를 유지하고 있음을 알 수 있다. 타각 우현  $15^\circ$  가  $35^\circ$  에 비해 타각이 작으므로 타효에 의한 선속의 감속 속도가 작아 선속이 상대적으로 크고 횡경사 각은 작으므로 다소 낮은 선회 시의 원심력에 의한 외방경사도 역시 커지게 되었으며 선회시험의 선회궤적은 실제 사고 당시의 AIS 항적을 훨씬 벗어나서 우회두하였다는 것을 알 수 있다. 또한 최대 횡경사가 발생한 후에도 횡경사각의 감소율이 낮아 우회두가 계속 유지되어 실선 GM 30cm인 경우 타각 우현 전타인 경우와 같이 실제 AIS 항적과는 달리 안쪽으로 궤적이 감긴다는 것을 알 수 있다.

Table 4와 Table 6, Fig. 33과 Fig. 42에서 알 수 있듯이 실선 GM 20cm인 경우 타각 우현  $15^\circ$  인 경우가 실선 GM 30cm인 경우 타각 우현  $35^\circ$  전타인 경우보다 선회경이 더 크다는 것을 알 수 있다. 이것은 외방경사 시의 횡경사각은 GM에 의해, 선회경은 타각에 의해 더 큰 영향을 받는다는 것을 유추할 수 있다.

#### 4.6 선회시험 결과에 대한 고찰

세월호 급선회에 따른 전복사고에 대한 사고원인의 분석을 위하여 1/150 축척의 원격조종 가능한 모형선을 이용한 GM 변화에 따른 선회시험의 결과는 다음과 같다.

- 모형선이 축척 1/150의 소형선을 이용한 선회시험에서 얻은 결과이어서 실선으로 바로 확장하기에는 다소 무리가 있을 여지가 있다. 그러나 실선 GM이 90cm 정도로 충분한 경우 우현 전타에 의한 선회 시의 횡경사는 약  $7^\circ$  정도이었고, 이는 사고선박의 시운전 선회시험 시의 최대 횡경사  $7.5^\circ$  와

유사하다는 것을 알 수 있었다.

- 타를 우현으로  $35^\circ$  전타하면 타에는 좌현으로 타력이 발생하면서 우선회를 하면서 일시적으로 우현으로 내방경사가 발생하다 선박의 무게 중심이 좌현으로 원심력이 크게 발생하면서 빠른 속도로 큰 외방경사가 발생하면서 좌현으로 급격히 횡경사가 발생하는 것이 일반적인 급선회의 선회특성으로서 Fig. 43과 같다.

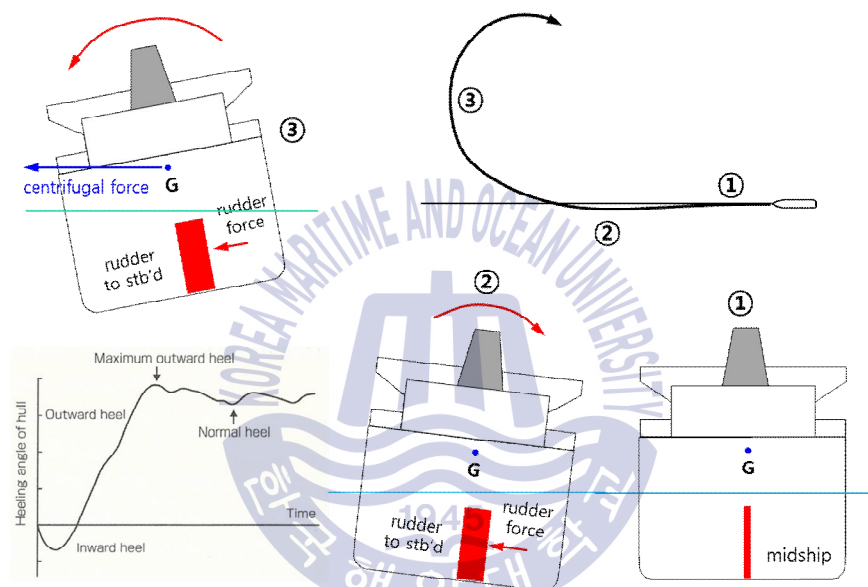


Fig. 43 Rapid turning due to rudder angle

- GM이 작아질수록 조타 선회 시의 외방경사가 현저히 증가되어 최대 외방 횡경사 각도도 크게 증가되는 경향을 본 모형선의 선회시험을 통하여 확인할 수 있었다.
- 선회 중인 선박의 좌현 횡경사가 점점 증가될수록 우현 추진기는 점점 자유수면으로 올라가면서 추진기 상부에 캐비테이션 등이 발생하면서 추진기의 추력이 감소하고 선속도 감소하게 된다. 사고선박인 경우 약  $25.9^\circ$  정도 횡경사하게 되면 우현 추진기는 수면에 노출되기 시작하고 좌우 추진기의 추력의 불균형과 선박의 선측 외부형상에 따라 선회경이 현저히 작아지면서 우선회가 급격히 가속화된다는 것을 실선 GM 30cm의 모형선 선



회시험에서 확인할 수 있었다.

- Fig. 44에서와 같이 사고선박의 시운전 시 좌현의 추진기만 작동한 감축운전 시의 우현 전타에 15.4노트의 선속에서의 우선회 궤적에서 알 수 있듯이 최대종거와 횡거는 각각 415m와 515m로서 Fig. 2에서의 양측운전 시의 우선회 시의 최대종거와 횡거가 각각 475m와 563m임에 비하여 각각 14.4%와 9.3% 만큼 짧아졌다는 것을 알 수 있다.

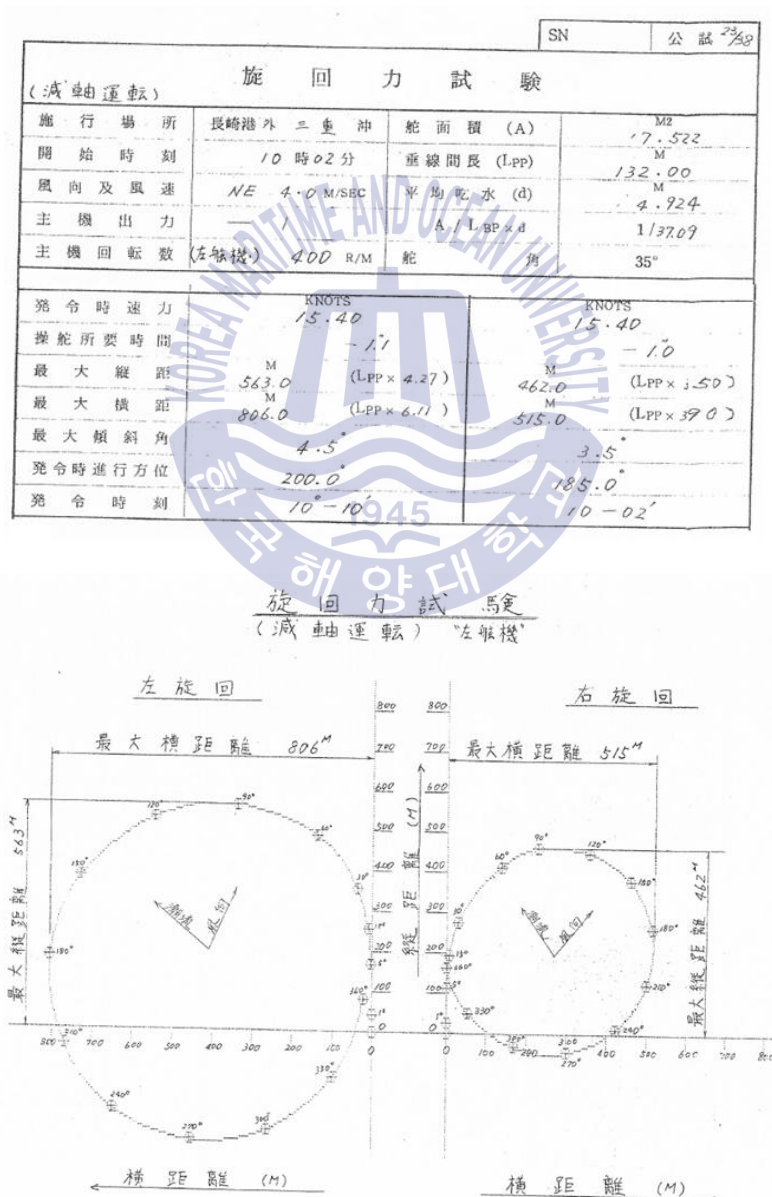


Fig. 44 Sea trial turning test report(port propeller propulsion)

- 실선 GM 30cm 의 모형선 선회시험에서와 같이 선회궤적은 사고선박의 AIS 궤적보다 다소 크게 벗어났지만 타를 계속 우현 전타로 타각을 고정하였을 경우에는 계속 우선회가 발생하여 원을 그리며 사고선박의 AIS 항적을 꺾어 들어왔으며 다소 늦게 타를 좌현 15도로 변경하였을 경우에서와 같이 사고선박의 AIS 항적과 같이 급선회 후 직선으로 나아가지 못하였음을 알 수 있다. 이로 미루어 최대 횡경사가 발생한 후 다소 빠른 시간 내에 타각 변경을 하여야 할 것으로 사료된다.
- 기존 우현 전타의 타각에서 좌현 15도로 변경하게 되면 타에는 좌현으로 타력이 타에 발생하고 선박 중심에 원심력이 우현으로 작용하여 기존의 원심력은 다소 감소함으로써 우선회 선회경이 다소 증가하게 된다.
- 실선 GM 20cm 의 모형선 선회시험에서와 같이 선회궤적은 사고선박의 AIS 궤적을 어느 정도 잘 따라가고 있었으며 최대 횡경사가 발생한 후 늦지 않게 타각을 좌현으로 15도 변경함으로써 선회경이 크게 증가하면서 선회궤적이 원형으로 감기지 않고 실제 사고선박의 AIS 항적과 유사하게 따라가고 있음을 알 수 있다.
- 급선회 시 최대 횡경사각의 크기는 실선 GM의 크기에 좌우되었고, 선회경은 타각의 크기에 좌우된다는 것을 본 모형선 선회시험을 통하여 확인할 수 있었다.
- 사고선박의 AIS 항적과 매우 흡사하게 선회궤적을 따라가고 최대 횡경사가 약 37도 정도까지 발생하고 GM이 작아지면 선회경도 현저히 작아진다는 경향은 본 사고선박의 급선회 시의 선회특성을 대체적으로 잘 분석하였다고 볼 수 있으나, 앞에서 언급한 바와 같이 본 선회시험에서는 유체의 표면 효과와 차량 및 화물 등의 고박상태에 따른 급선회 시 좌현으로 쏠리는 현상 등을 고려하지 않고 이를 감안한 GoM 에 준하는 GM을 설정하였다. 앞으로 이러한 인자들을 고려하고 보다 더 큰 모형선을 사용하여 선회시험을 수행하여 보다 객관적인 선회특성을 분석하는 것이 필요할 것이다.

## 5. 결 론

항주 중인 로로 페리선 세월호가 부족한 복원성으로 인하여 선회를 하던 중 급선회가 발생하여 전복된 사고가 발생하였으며, 여러 기관과 학계의 전문가들이 사고선박의 전복사고 시의 차량과 화물, 발라스트, 청수 및 연료유 등을 파악하고 복원성의 지표인 GoM과 고박상태를 추정하여 다양한 급선회 시뮬레이션을 수행하여 급선회 전복사고의 원인을 분석하였으나 객관적인 GoM과 고박상태가 정확히 밝혀지지 않은 상황에서 모형선의 선회시험 등을 통한 객관적인 선회특성을 분석할 필요가 있었다. 본 연구에서는 추진장치와 원격조종이 가능하고 실시간 측정할 수 있는 계측장치를 부착한 사고선박의 모형선을 이용하여 다양한 GM 변화에 따른 선회시험을 수행하고 사고선박의 AIS 항적과 비교 검토하여 급선회에 따른 선회특성을 해양안전심판원의 지원으로 분석하였다.

선박의 급선회 시의 선회특성은 선박의 선형, 추진장치, 조타장치, 복원력, 선속 등이 복합적으로 연계되어 있으므로, 본 연구에서는 사고선박의 선도를 비롯한 도면을 기반으로 3차원 프린터로 모형선을 제작하였고, 사고선박과 최대한 유사한 선박운동 조종이 가능하도록 원격으로 조종되는 2축 1타선 장치를 설치하고 조타장치는 동시에 조타지시기와 연동되도록 하였다. 또한 모형선의 선회시험 시 타각과 횡경사 및 선수방향의 변화를 실시간 측정할 수 있도록 하여 모형선의 선회특성을 잘 구현할 수 있는 모형선 선회시험을 수행하였다.

본 연구에서는 실제 사고선박의 유체의 자유수면 효과와 차량과 화물의 고박상태를 모형선 선회시험으로 정확히 구현하는데 있어 한계가 있어 예상되는 GoM을 감안하여 실선 GM 90cm, 60cm, 30cm 및 20cm를 설정하여 우현 전타 35°의 타각을 사용하여 선회시험을 실내수조에서 수행하였으며 선회궤적을 캠코드로 기록하였다. 또한 GM이 30cm와 20cm인 경우에는 최대 횡경사가 발생한 후 좌현 15°의 타각을 적용하는 시간에 따른 선회특성과, GM이 20cm인 경

우에는 우현  $15^\circ$ 의 타각을 사용하여 타각의 크기에 따른 선회궤적을 사고선박의 AIS 항적과 비교 검토하여 다음과 같은 선회특성 등을 분석하였다.

1. 실선의 GM이 작아질수록 선회궤적의 선회경도 점점 작아졌고, GM이 20cm 일 때 최대 횡경사가 발생하는 모형선의 선회궤적은 사고선박의 AIS 항적에 가장 근접하였다.
2. 우현 전타인  $35^\circ$ 의 타각이 계속 적용될 경우 모형선의 선회시험에 다소 협소한 실내수조의 상황에서는 실선 GM 30cm 및 20cm인 경우에만 우회두가 계속 발생하여 사고선박의 AIS 항적 안쪽으로 감겨 들어왔다.
3. 최대 우방 횡경사가 발생한 후 늦지 않은 시각에 타각을 좌현  $15^\circ$ 로 적용하였을 경우에 사고선박의 AIS 항적과 대체적으로 유사하였고, 본 연구에서는 실선 GM이 20cm일 경우 가장 근접하였다.
4. 급선회 시 최대 횡경사의 크기는 실선 GM의 크기에 좌우되었고, 선회경은 타각의 크기에 주로 좌우된다는 것을 본 모형선 선회시험을 통하여 확인할 수 있었다.

이상의 모형선 선회시험을 통하여 사고선박의 급선회 사고에 따른 선회특성을 상당히 합리적인 추정을 할 수 있었으나, 현재의 모형선의 실선 축적비 1/150을 1/75 정도로 보다 큰 모형선을 사용하여 모형선의 사용 시 나타날 수 있는 축소효과를 줄이고 유체의 표면효과와 차량 및 화물의 고박상태를 구현하여 보다 더 합리적인 선회특성을 추후 연구로 추정하고자 한다.

또한 국내의 연안 로로 페리선 등을 비롯하여 화물적재 시스템과 항해사들의 한계 등으로 출항 전후에 선박의 GM을 정확히 추정하지 못하는 것이 현실적인 문제이다. 이를 해결하기 위해서는 원목선에서 실무적으로 이미 사용하고 있는 경사시험과 횡경사 주기를 확인하여 수동으로 계산하는 간이 GM 산정방식을 기계화와 디지털화하여 선박의 GM이 항상 자동적으로 표시될 수 있는 계기의 개발이 필요하다고 판단되어 이를 위한 추후 연구도 수행하고자 한다.

## Reference

- 목포해심, 2008. *탱커선 이스턴브라이트호 침몰사건*(재결번호: 목해심 제2008-43호), 목포지방해양안전심판원.
- 선박해양성능고도화연구사업단, 2014. *세월호 전복 시뮬레이션 보고서*(4차 해석결과), 서울대학교.
- 선박해양플랜트연구소, 2014. *세월호 침몰사고 원인 분석*(선박조종 및 침수·침몰 시뮬레이션), 세월호 침몰사고 합동수사본부 최종보고서.
- 합동수사본부 전문가 자문단, 2014. *여객선 세월호 침몰 사고 원인분석 결과 보고서*.
- 해양안전기술, 2016. *세월호의 항적과 경사각을 이용한 전복·침수과정 재현*, 4.16세월호참사 특별조사위원회 최종보고서.
- 해양안전심판원 특별조사부, 2014. *여객선 세월호 전복사고 특별조사 보고서*(*Safety Investigation Report*), 중앙해양안전심판원.
- 윤점동, 2016. *선박조종의 이론과 실무*, 세종출판사.
- 임남균, 2015. *AIS 데이터 시뮬레이션 및 선박 운항특성 연구용역*, 세월호 특별조사위원.
- 한국무역협회, 2016. *무역용어사전*.
- 한국해양연구원, 2002. *선박의 이해*, 제4장 제4절 *선박의 조종성능*, 해양과학총서 8.
- IMO, 1993. Resolution A.751(18): Interim Standards for Ship Maneuverability, (adopted on 4 November, 1993), International Maritime Organization.



IMO, 200a. Resolution MSC.137(76): Standards for Ship Maneuverability, (adopted on 4 December, 2002), International Maritime Organization.

IMO, 200b. MSC/Circ.1053, Explanatory Notes to the Standards for Ship Maneuverability, (adopted on 16 December, 2002), International Maritime Organization.

Lee, S.G., Lee, J.S., Park, J.H. & Jung, T.Y., 2017. Investigation of Capsize Accident Cause of Sewol Ro-Ro Ferry Ship, *Proceedings of Asia Navigation Conference 2017*, November 23-25, Zhanjiang China, pp. 1-16.



## Acknowledgement

조선해양시스템공학을 학부생으로 전공하지 못한 부족한 저에게 석사과정을 시작할 때부터 지금까지 저에게 정성어린 많은 가르침을 주시고, 특히 논문작성에 있어 수많은 조언과 연말의 바쁜 와중에도 항상 온화하고 자상한 미소와 함께 세심한 검토와 적극적인 지도 편달을 아끼지 않은, 뜨거운 열정의 이상갑 교수님께 무한한 감사를 드립니다.

또한, 본 논문을 위해 심사와 조언을 아끼시지 않은 현범수 교수님과 이성욱 교수님께도 깊은 감사드리며, 2년 동안의 석사과정동안 조선해양시스템공학이라는 학문의 깊이를 심도 있게 해주신 교수님들께도 감사드립니다.

해사법학과라는 인문대 박사과정을 수료하였음에도 불구하고, 조선해양시스템공학이라는 학문의 세계와 필요성을 인지하게 해 주시고, 해상보험과 손해사정 실무분야에서 전념할 수 있도록 인도해 주신 (주)한리해상손해사정의 창업자이자 제 인생의 스승인 김창현 회장님께도 진심어린 고마움을 표합니다. 그리고, 모형선박에 의한 자유항주 실험을 실시하도록 동기와 기회를 부여해주시고, 한국해양수산연수원 용당 캠퍼스의 ROV 실내수조에서 순조롭게 실시할 수 있도록, 직·간접적으로 지원해주신 해양안전심판원의 심판관님 및 해심 관계자 여러분들과 당시의 실험에 참관하여 주신 여러 기관의 관계자님께도 다소 늦은 감이 있지만, 감사의 말씀을 전합니다.

마지막으로 어떤 경우에도 항상 변하지 않고, 굳건한 믿음과 사랑을 함께하는 소중한 가족과 부모님께도 감사드립니다.